

Évaluation des impacts énergétiques et environnementaux de différents modes d'agriculture urbaine en environnement contrôlé

par

Frédéric LÉVEILLÉ-GUILLEMETTE

MÉMOIRE PAR ARTICLES PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE, ÉNERGIES
RENOUVELABLES ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 15 JUILLET 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Frédéric Léveillé-Guillemette, 2019



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Danielle Monfet, directrice de mémoire
Département de Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Annie Levasseur codirectrice de mémoire
Département de Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Rousse, président du jury
Département de Génie Mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Mathias Glaus, membre du jury
Département de Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 9 MAI 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Ce projet ne s'est certainement pas réalisé grâce à mes seuls efforts. J'aimerais remercier le FQRNT et l'ÉTS pour l'appui financier pour la réalisation de ma maîtrise. Lorsque de telles institutions récompensent notre excellence passée et notre potentiel en recherche, cela rend accessible des projets et défis initialement hors de notre portée.

Un merci spécial à Quartier Nourricier pour nous avoir donné l'accès à leurs données de construction et d'opération de leur nouvelle serre.

Je tiens également à remercier mes directrices de recherche, Danielle et Annie, pour leur support, leur flexibilité et leur empathie. Le chemin de la maîtrise n'est pas toujours des plus facile, j'ai eu la chance d'avoir des directrices en or avec qui discuter et qui savaient quand et comment me recentrer sur l'essentiel. Un merci tout particulier à Danielle, sans qui je n'aurais même pas envisagé les cycles supérieurs.

Finalement, sur une note plus personnelle, merci à ma conjointe Andréane. Merci pour le support et l'écoute dans les moments plus difficiles. Merci pour l'amour, la confiance, le respect et que tu me portes de façon indéfectible. Lorsqu'on se regarde à travers tes yeux, on se sent capable de tout et on sait qu'on finira par y arriver.

Évaluation des impacts énergétiques et environnementaux de différents modes d'agriculture urbaine en environnement contrôlé

Frédéric LÉVEILLÉ-GUILLEMETTE

RÉSUMÉ

La densification des villes, l'augmentation de la demande de production agricole, l'accessibilité alimentaire, la participation citoyenne, la promotion de l'économie locale, la réduction du transport ou la réduction de l'empreinte environnementale sont d'autant de raisons qui expliquent l'intérêt grimpant pour l'agriculture urbaine. Dans un climat québécois, les productions soutenues sur toute l'année doivent se faire dans des espaces contrôlés. Plusieurs types d'espaces d'agriculture contrôlée peuvent s'intégrer en ville : serres traditionnelles, serres sur toit ou encore des espaces d'agriculture intégrée au bâtiment (eAIB) comme des cultures hydroponiques empilées verticalement. Toutefois, les impacts potentiels de ces types de production peuvent être très différents et sont actuellement peu connus. Également, peu de données sont disponibles pour l'analyse de ces types de production. Dans une optique de réduction de l'empreinte environnementale de la production agricole, il importe de quantifier les impacts potentiels de ces nouveaux types de production.

L'objectif principal de ce mémoire est de quantifier les impacts environnementaux potentiels de différents types de production agricole en environnement contrôlé pouvant s'intégrer en ville dans un contexte énergétique québécois. Pour ce faire, quatre scénarios sont comparés en utilisant la méthode d'analyse environnementale du cycle de vie (ACV) : (1) une serre traditionnelle sur sol, (2) une serre sur toit, (3) un eAIB avec éclairage naturel et artificiel, (4) un eAIB avec éclairage artificiel uniquement, qui sont soit chauffées au gaz dans le cas des serres ou climatisées avec des systèmes électriques pour les eAIB. Comme il existe très peu de données disponibles sur les consommations énergétiques de tels scénarios, des modèles énergétiques sont montés pour chaque scénario à l'aide d'outils de simulation de la performance de bâtiment (SPB). Une calibration d'un premier modèle (serre sur sol) est également effectuée afin de renforcer la confiance dans les estimations des gains thermiques des plantes et des consommations énergétiques associées au maintien des conditions de culture (température et humidité). Le modèle calibré a permis d'évaluer certaines mesures de conservation de l'énergie. Parmi les mesures analysées, les économies d'énergie varient entre 5% et 30% et la mesure avec la période de retour sur investissement la plus rapide est l'isolation du mur nord (entre 9 et 16 ans à 3,36 \$/GJ).

En ce qui a trait aux résultats de l'ACV, ils tendent à démontrer qu'aucun scénario ne performe mieux dans toutes les catégories d'impacts environnementaux. Les scénarios de la serre sur toit et de l'eAIB avec éclairage naturel obtiennent de meilleurs scores de façon générale pour l'ensemble des catégories. Le score du réchauffement climatique potentiel varie entre 0.62 et 2.79 kg CO₂ eq. L'analyse de sensibilité effectuée tend à démontrer que les types d'éclairage et le transport n'affectent pas les tendances générales des résultats, mais que les sources d'énergie

de chauffage peuvent grandement influencer les résultats. Au Québec, la priorité devrait être donnée à l'utilisation d'énergies renouvelables (maximisation de l'éclairage naturel, utilisation d'électricité pour le chauffage, etc.) pour réduire l'empreinte environnementale de la production agricole.

Mots-clés : agriculture intégrée au bâtiment, agriculture urbaine, analyse du cycle de vie, simulation de la performance de bâtiment

Evaluation of energetic and environmental impacts of urban agriculture in controlled environment

Frédéric LÉVEILLÉ-GUILLEMETTE

ABSTRACT

Urban densification, increasing food demand, food accessibility, community empowerment, promotion of local economy, transport reduction or environmental footprint reduction are many reasons that explain the growing interest in urban agriculture. In Quebec's climate, year-round productions are done in controlled spaces. Many types of agricultural controlled spaces can be integrated into a city: traditional greenhouses on ground, rooftop greenhouses, or even building integrated agricultural spaces (BIAs) like vertically stacked hydroponic production. However, potential impacts of these kind of productions vary greatly and are not well known. Also, there is a lack of data for the analysis of these productions. Considering the need to reduce the environmental footprint of food production, it is important to quantify the potential impacts of these new types of production.

The main objective of this thesis is to quantify potential environmental impacts of different urban agriculture production in controlled environment in the Quebec's energetic context. To do so, four scenarios are compared using environmental life cycle assessment (LCA) methodology: (1) a traditional greenhouse on ground, (2) a rooftop greenhouse, (3) a BIAs with natural and artificial lighting, (4) a BIAs with artificial lighting only, that are either gas heated for the greenhouses or cooled using electric systems for the BIAs. Since there is little to no data available on the energetic consumption of these scenarios, building performance simulation (BPS) tools are used to create an energetic model of each scenario. The calibration of a greenhouse is also completed to reinforce the trust in the plant heat gains model and the estimated energetic consumption to maintain culture conditions (temperature and humidity). The calibrated model allowed the analysis of some energy-saving measures. Among the tested measures, the energy savings vary between 5% and 30%, with the insulation of the North wall having the shortest payback (between 9 and 16 years with 3.36\$/GJ).

Regarding the LCA results, they tend to indicate that no scenario performs better in every environmental impact category. The rooftop greenhouse and the BIAs with natural lighting have generally lesser impacts than the other two scenarios. The global warming potential score varies between 0.62 and 2.79 kg CO₂ eq for all scenarios. The sensitivity analysis tends to indicate that lighting type and transport distances do not affect the general trends in results. However, a change in the energy source can have great impacts on the results. In Quebec, in order to reduce the environmental footprint of food production, priority should be set to promote renewable energy use like maximising the natural lighting when possible and using electricity for heating.

Keywords: building integrated agriculture, urban agriculture, life cycle assessment, building performance simulation

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Agriculture en environnement contrôlé	3
1.1.1 Serres.....	3
1.1.2 Agriculture urbaine	4
1.2 Simulation énergétique	7
1.2.1 Simulation de la performance des bâtiments	7
1.2.2 Simulation des serres	8
1.2.3 Simulation d'espace d'agriculture intégré au bâtiment (eAIB)	9
1.3 Analyse du cycle de vie (ACV)	13
1.3.1 Étapes de l'ACV	14
1.3.2 ACV tomate de la tomate.....	16
1.4 Constats.....	22
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE.....	25
2.1 Objectifs.....	25
2.2 Méthodologie	26
CHAPITRE 3 CALIBRATION D'UN MODÈLE ÉNERGÉTIQUE D'UNE SERRE ET ANALYSE DE MESURES D'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE.....	29
CHAPITRE 4 GREENHOUSE VERSUS BUILDING-INTEGRATED AGRICULTURAL SPACE (BIAS) IN QUEBEC: COMPARISON USING BUILDING PERFORMANCE SIMULATION AND LIFE CYCLE ASSESSMENT.....	35
4.1 Introduction.....	35
4.2 Materials and methods	40
4.2.1 Site selection	41
4.2.2 Building and crop selection	41
4.2.3 Simulation of the energy consumption	44
4.2.4 Life cycle inventory	46
4.2.5 Life cycle impact assessment.....	47
4.2.6 Sensitivity analysis.....	48
4.3 Results.....	48
4.3.1 Energy portfolio	48
4.3.2 LCA results	50
4.3.3 Sensitivity results	52
4.3.4 Discussion	56
4.3.5 Conclusion	60
4.3.6 Acknowledgements.....	61

CHAPITRE 5 DISCUSSION	63
CONCLUSION	69
ANNEXE I CALIBRATION D'UN MODÈLE ÉNERGÉTIQUE ET ANALYSE ÉCONOMIQUE DE MESURES DE CONSERVATION D'ÉNERGIE D'UNE SERRE COMMUNAUTAIRE À MONTRÉAL	71
ANNEXE II TOMATO PRODUCTION HEATED GREENHOUSE FLOWS MODIFICATIONS	93
ANNEXE III BPS INPUTS.....	97
ANNEXE IV ESTIMATED TOMATO PLANT HEAT GAINS	99
ANNEXE V INPUTS SUMMARY FOR BPS AND LCIA	101
BIBLIOGRAPHIE	107

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Catégorisation d'études récentes traitant d'agriculture urbaine.....6
Tableau 1.2	Définition du niveau technologique des serres étudiées16
Tableau 1.3	Sommaire des ACV de la tomate.....17
Tableau 3.1	Principaux résultats de la calibration de la serre.....30
Tableau 3.2	Résultats d'analyse de MCE sur la serre31
Tableau-A I-1	Comparaison de la température et de la consommation de gaz mesurée et simulée pour différents points de consigne, mars à août 201777
Tableau-A I-2	Comparaison des méthodes de conduction par le sol d'EnergyPlus.....78
Tableau-A I-3	Comparaison de la température et de la consommation de gaz mesurée et simulée pour différentes températures du sol sous le bâtiment, mars à août 2017.....79
Tableau-A I-4	Comparaison de la température et de la consommation de gaz mesurée et simulée pour différentes caractéristiques d'enveloppe, mars à août 2017....80
Tableau-A I-5	Comparaison de la température et de la consommation de gaz mesurée et simulée pour différents débits de ventilation naturelle, mars à août 2017....82
Tableau-A I-6	Analyse des coûts pour les MCE86
Tableau-A II-1	Case 1 - Greenhouse93
Tableau-A II-2	Case 2 - Rooftop Greenhouse92
Tableau-A II-3	Case 3 - BIAs with natural and electrical lighting (BNEL).....95
Tableau-A II-4	Case 4 - BIAs with electrical lighting only (BELO).....96
Tableau-A III-1	Greenhouse envelope and HVAC systems summary97
Tableau-A III-2	NECB modification to include agricultural space98

XIV

Tableau-A IV-1 Sensible and latent loads for 400 ppm CO ₂ and 80 W m ⁻² lighting intensity	99
Tableau-A IV-2 Sensible and latent loads for 400 ppm CO ₂ and 0 W m ⁻² lighting intensity	100

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Nomenclature agriculture urbaine adaptée de Talbot (2019)5
Figure 1.2	Historique du développement de modèles de simulation de plantes10
Figure 1.3	Serre passive intégrée au bâtiment de l’Institut d’Environnement de Science et de Technologie et de l’Institut Catalan de Paleontologie (Nadal et al., 2017).....11
Figure 1.4	Cadre méthodologique d'ACV adapté d’ISO (2006a)14
Figure 1.5	Catégorisation des scores de réchauffement climatiques selon la température et le niveau technologique pour 1 kg de tomate.21
Figure 2.1	Schéma de la méthodologie de recherche28
Figure 4.1	Relationship between life cycle global warming score and average annual temperature for various studies, adapted from (Dias et al., 2017).....36
Figure 4.2	Diagram of the methodology40
Figure 4.3	Illustration of the four case studies42
Figure 4.4	System boundaries for the life cycle inventory.....47
Figure 4.5	Estimated energy consumption distribution.....49
Figure 4.6	Endpoint results normalised with the highest impact case50
Figure 4.7	Contribution analysis for endpoint impact categories51
Figure 4.8	Midpoint contribution to endpoint impacts.....52
Figure 4.9	Sensitivity analysis on building light types and greenhouse heating sources; Geothermal heat pump (GTHP), Air-source heat pump (ASHP).....53
Figure 4.10	Sensitivity analysis on neglecting crops heat gains (NC).....54
Figure 4.11	Sensitivity analysis of transport distance56

Figure 5.1	Comparaison du score de réchauffement climatique potentiel de la tomate du Québec avec d'autres régions du monde. BENA : Bâtiment avec éclairage naturel et artificiel. BEAU : Bâtiment avec éclairage artificiel uniquement.....	65
Figure-A I-1	Images de la serre.....	73
Figure-A I-2	Consommation mensuelle de gaz mesurée et simulée, mars à août 2017	75
Figure-A I-3	Variation de la température de la serre mesurée et simulée, 17-23/04/2017	76
Figure-A I-4	Comparaison de la température de la serre mesurée et simulée selon les points de consignes, 17-23/04/2017.....	77
Figure-A I-5	Températures du sol sous le bâtiment évaluées	78
Figure-A I-6	Consommation mensuelle de gaz mesurée et calibrée mars à août 2017	83

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse du cycle de vie
ACCV	Analyse des coûts du cycle de vie
AECV	Analyse environnementale du cycle de vie
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AU	Agriculture urbaine
CAH	Changement d'air à l'heure
CCQ	Commission de la construction du Québec
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers
CNB	Code National du Bâtiment
CNBA	Code National du Bâtiment Agricole
CVCA	Chauffage, ventilation et conditionnement d'air
CVRMSE	Coefficient of variation of the root mean square error
DEL	Diode électroluminescente
eAIB	espace d'agriculture intégré au bâtiment
FAO	Food and Agriculture Organization
FRQNT	Fonds de recherche du Québec Nature et technologies
G	Goodness of fit
GES	Gaz à effet de serre
HPS	High-Pressure Sodium
ISO	International Organization for Standardization
LED	Light-emitting diode
MBE	Mean bias error
MCE	Mesure de conservation de l'énergie
NMBE	Normalised mean bias error
PRI	Période de retour sur l'investissement
RMSE	Root mean square error
SETAC	Société de la Toxicologie Environnemental et de Chimie

XVIII

SHP	Sodium sous haute pression
SPB	Simulation de la performance du bâtiment
UN	United Nations

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

T_{in}	Température maintenue dans la serre [°C]
T_{sol}	Température du sol [°C]
$T_{0.5m}$	Température à 0.5 m dans le sol [°C]
V_{design}	Débit de conception de ventilation naturelle [m ³ s ⁻¹]
$F_{schedule}$	Facteur d'horaire d'ouverture des volets
T_{zone}	Température de la zone [°C]
T_{odb}	Outside air dry-bulb temperature [°C]
q_i	Débit de ventilation naturelle [m ³ s ⁻¹]
C_{di}	Coefficient de décharge de l'ouverture
A_i	Aire totale de l'ouverture [m ²]
S_i	Coefficient du sens du débit
Δp_i	Différence de pression de l'ouverture [kPa]
ρ_0	densité de l'air au niveau du sol. [kg m ⁻³]

INTRODUCTION

À l'heure actuelle, l'empreinte environnementale de la consommation de nourriture (foodprint) occupe une très grande part des impacts totaux d'une ville (Goldstein, Birkved, Fernández, & Hauschild, 2016a). Cela est majoritairement causé par le fait que les villes n'ont pas assez d'infrastructures ou de ressources pour produire tous leurs intrants ou même gérer tous leurs déchets. Cette situation n'ira qu'en s'aggravant avec l'augmentation de la population et la densification des villes. Il est en effet projeté que des 10 milliards d'humains qui peupleront la terre en 2050, 60% habiteront dans les villes (FAO, 2017; UN, 2015). Pour combler la demande en nourriture, la production actuelle devra être augmentée de 50%.

L'agriculture représente d'ailleurs l'un des secteurs les plus contributeurs aux problèmes environnementaux. Ces problèmes sont déjà toutefois bien connus et plusieurs proposent un développement soutenu de l'agriculture urbaine (AU) comme solution potentielle (FAO, 2017; Milan, 2015). Il est vrai que l'agriculture urbaine est souvent présentée comme plus respectueuse de l'environnement que l'agriculture conventionnelle (Goldstein, Hauschild, Fernández, & Birkved, 2016), mais les nombreux avantages attendus ont été très peu quantifiés et ont une forte sensibilité à la variabilité géographique et technologique (Goldstein et al., 2016).

Afin de répondre à la demande croissante d'aliments et aux objectifs de réduction des gaz à effet de serre (GES) (Gouvernement du Canada, 2016; Gouvernement du Québec, 2016), il est impératif de quantifier les impacts environnementaux associés aux différents modes de culture en ville. Cela permettra également de guider la prise de décision dans l'établissement de politiques ou de projets d'agriculture urbaine. Cette étude ne s'intéresse qu'aux modes de production en environnements contrôlés. Ces modes de production sont largement plus contributeurs aux impacts environnementaux et permettent des rendements agricoles généralement plus élevés et plus soutenus sur toute l'année. L'objectif général de cette étude

est de comparer les impacts environnementaux potentiels, en utilisant l'analyse du cycle de vie (ACV), de différents espaces d'agriculture en environnement contrôlé pouvant s'intégrer en ville, et ce dans le contexte énergétique québécois. Quatre scénarios sont étudiés : la serre traditionnelle sur sol, la serre sur toit, l'espace d'agriculture intégré au bâtiment avec éclairage naturel et électrique ainsi que l'espace d'agriculture intégré au bâtiment avec éclairage électrique uniquement.

L'audience visée par cette étude inclut les producteurs en serre, les décideurs politiques et les consommateurs. Les producteurs pourraient utiliser les résultats de cette étude pour considérer des possibilités d'amélioration de leurs systèmes et pour positionner leur produit sur le marché mondial d'import/export de la tomate. Les décideurs pourraient mieux orienter leurs programmes de financement et de développement en accord avec leurs objectifs de réduction de GES. Les consommateurs auront des indicateurs clairs leur permettant de mieux guider leurs achats.

Le CHAPITRE 1 de ce mémoire présente en détail la revue de littérature effectuée sur les thèmes de l'agriculture en environnement contrôlé, des outils de simulation énergétique en agriculture et dans les bâtiments ainsi que sur l'analyse du cycle de vie (ACV). Le CHAPITRE 2 présente les objectifs et la méthodologie générale employée dans la calibration d'un modèle énergétique de serre du CHAPITRE 3 et l'ACV comparative d'espaces d'agriculture en environnement contrôlé du CHAPITRE 4. Le CHAPITRE 5 discute les résultats globaux des deux articles et finalement, la conclusion est présentée.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Agriculture en environnement contrôlé

Les pratiques d'agriculture en environnement contrôlé remontent déjà à plusieurs siècles. Dans les années 1800, certains s'intéressaient déjà à la géométrie que devrait posséder une serre pour collecter le plus d'irradiation solaire (Knight, 1808). L'intérêt d'un contrôle de l'environnement des cultures peut s'expliquer par des rendements supérieurs aux cultures en champs et par l'extension des périodes de récoltes dans des climats plus extrêmes ou même hostiles aux plantes (Wittwer & Castilla, 1995). Aujourd'hui, l'agriculture en environnement contrôlé s'effectue avec des méthodes des plus rudimentaires aux plus complexes, allant du tunnel en polyéthylène jusqu'aux espaces d'agriculture intégrée au bâtiment (eAIB).

1.1.1 Serres

La culture en serre est une méthode d'agriculture en environnement contrôlé qui a été étudiée extensivement. La revue de littérature de la thèse de Bastien (2015) ainsi que les articles de Critten et Bailey (2002) et de Montero, Munoz, Baeza, et Stanghellini (2017) font une excellente présentation des travaux effectués depuis les années 1970.

Récemment, de nombreuses études s'intéressent à l'aménagement des serres en villes et à leur intégration à des bâtiments (Bastien, 2015; Benis, Reinhart, & Ferrao, 2017; Goldstein et al., 2016b; Nadal et al., 2017; Pons et al., 2015; Sanjuan-Delmás et al., 2018; Sanyé-Mengual, Kahane, Gianquinto, & Geoffriau, 2018; Sanyé-Mengual, Oliver-Solà, Montero, & Rieradevall, 2015). L'intégration des serres en villes est une façon parmi tant d'autres de faire de l'agriculture urbaine. Certaines de ces études comparent d'ailleurs différents types de production en ville avec différents indicateurs économiques et environnementaux. Afin de

pouvoir facilement comparer les cas d'études, une catégorisation claire est nécessaire. Différentes catégorisations sont présentées dans la section suivante.

1.1.2 Agriculture urbaine

Bien que la culture dite urbaine ne soit pas si récente, plusieurs raisons peuvent expliquer le retour en force de l'intérêt pour ce type d'agriculture : accessibilité alimentaire et autosuffisance (des villes et des individus), densification des villes et augmentation de la production requise, réduction du transport et de l'empreinte environnementale, encourager l'économie locale, éducation et sensibilisation, participation citoyenne, etc. (Sanyé-Mengual, 2015).

Il existe toutefois plusieurs façons de faire de l'agriculture en ville qui ne répondent pas toutes de la même façon aux différents critères énoncés précédemment. Différentes catégorisations existent pour faciliter la comparaison de cas et l'analyse d'atteinte d'objectifs. Certaines catégorisations sont faites selon l'emplacement physique et le type de contrôle effectué (agriculture sur sol, agriculture en environnement contrôlé intégrée au bâtiment, etc.) (Goldstein et al., 2016c). D'autres catégorisent plutôt selon les objectifs initiaux des projets d'agriculture et les modèles économiques qui les soutiennent (jardin sans but lucratif, serre commerciale, etc.) (Sanyé-Mengual et al., 2018).

La catégorisation de Goldstein et al. (2016c) a récemment été reprise avec quelques nuances additionnelles pour les cas d'agriculture contrôlée tel qu'illustré à la Figure 1.1.

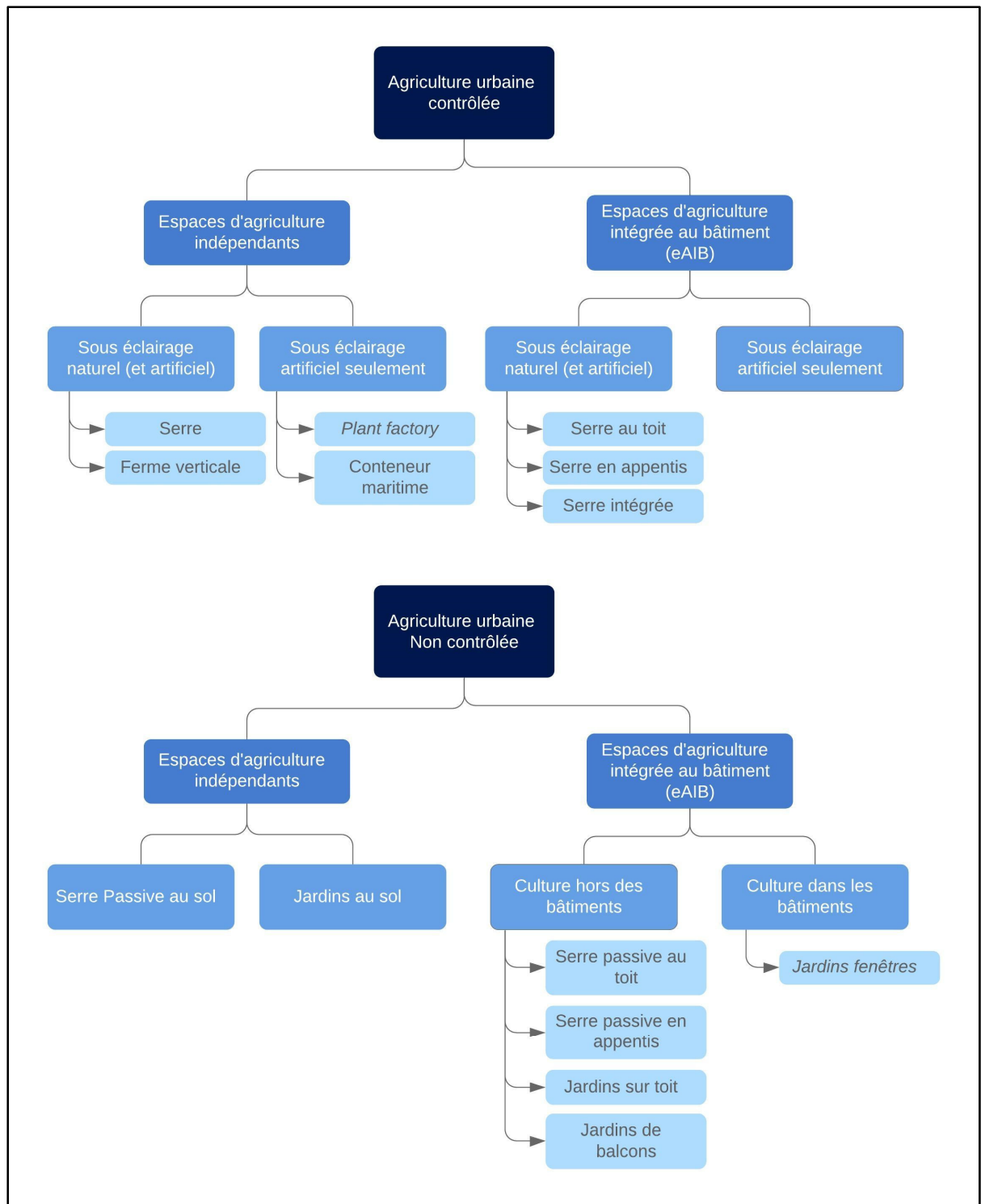


Figure 1.1: Nomenclature agriculture urbaine adaptée de Talbot (2019)

La nomenclature adaptée par Talbot (2019) est reprise pour le reste de ce travail. Le Tableau 1.1 présente certaines études récentes traitant d'agriculture urbaine en différenciant l'intégration ou non avec le bâtiment.

Tableau 1.1 : Catégorisation d'études récentes traitant d'agriculture urbaine

Auteurs	Types d'agriculture étudiées	Rapport au bâtiment
Plyler (2012)	Culture dans les bâtiments	eAIB
Whittinghill (2012)	Jardins sur toit	eAIB
Fisher (2014)	Jardins au sol	Espace d'agriculture indépendant
Bastien (2015)	Serre au toit	eAIB
Pons et al. (2015)	Serre intégrée au bâtiment	eAIB
Goldstein et al. (2016b)	Serre au toit et plant factory	eAIB et espace d'agriculture indépendant
Ercilla-Montserrat et al. (2017)	Serre intégrée au bâtiment	eAIB
Benis et al. (2017)	Serre au toit et plant factory	eAIB et espace indépendant

Tel qu'illustré au Tableau 1.1, les types de production en agriculture urbaine visent de plus en plus une intégration avec les bâtiments. Pons et al. (2015) illustrent d'ailleurs très bien les différentes synergies qui pourraient être exploitées (et donc la réduction de l'empreinte) en termes d'énergie, d'eau et d'eaux grises. Ce type de travaux de recherche est à la frontière entre deux domaines de recherche qui ont évolué parallèlement au cours des dernières années : le bâtiment et l'agriculture. Pour des enjeux similaires comme la quantification et l'analyse

énergétique, les deux domaines ont développé des méthodes et des outils différents. La section 1.2 présente les méthodes développées et utilisées dans ces deux domaines et propose un choix pour des études en agriculture intégrée aux bâtiments.

1.2 Simulation énergétique

Cette section présente les outils développés pour effectuer la simulation énergétique dans les domaines du bâtiment et de l'agriculture en serre. Ensuite, les approches reprises des deux domaines dans la modélisation d'espaces d'agriculture intégrée au bâtiment sont présentées.

1.2.1 Simulation de la performance des bâtiments

La consommation énergétique des bâtiments représente entre 20-40% de la consommation mondiale totale. Elle représente 40% aux États-Unis (Kim, 2016), 37% en Europe (Koesling, Ruge, Fystro, Torp, & Hansen, 2015) et 30% au Canada (Office de l'efficacité énergétique, 2016). Les requis techniques de différents domaines, les nombreux paramètres qui s'influencent les uns les autres ainsi que les nombreuses incertitudes rendent l'analyse de la performance des bâtiments très complexe. Les outils de simulation de la performance des bâtiments (SPB) visent à faciliter le travail interdisciplinaire de la conception des bâtiments et de leurs systèmes. Ils permettent entre autres de supporter la prise de décisions stratégiques lors de la conception, de faire des analyses de scénarios en utilisant des nouvelles technologies ou méthodes de conception, de prédire les impacts attendus de la modification d'un bâtiment existant, et bien d'autres choses (Clarke & Hensen, 2015).

Aujourd'hui, plusieurs logiciels de simulation énergétique, comme TRNSYS (Beckman et al., 1994), EnergyPlus (Crawley et al., 2001) ou ESP-r ont des architectures ouvertes et par modules. Cela permet à quiconque de développer de nouvelles fonctionnalités pour les intégrer aux modules existants. Cela permet entre autres un déploiement plus rapide et facilite la

contribution d'autres chercheurs. De récents modules supplémentaires permettent entre autres (Clarke & Hensen, 2015) :

- une meilleure représentation des débits d'air avec un nombre de Reynolds faible;
- une analyse du confort visuel et de l'apport en lumière naturelle;
- une analyse des flux d'humidité dans les matériaux;
- et plusieurs autres avantages.

Ces logiciels visent d'abord des bâtiments à occupation humaine et jusqu'à tout récemment, ne permettaient pas la simulation des plantes et leur interaction avec l'environnement.

1.2.2 Simulation des serres

Dans le domaine de l'agriculture en serres contrôlées, les coûts énergétiques de production sont presque exclusivement liés au maintien des conditions dans l'espace de culture (Syndicat des producteurs en serre du Québec, 2011). À l'instar du domaine du bâtiment, le domaine de l'agriculture en serres contrôlées utilise aussi des outils de modélisation pour effectuer des analyses énergétiques. Toutefois, les outils de modélisation utilisés ne sont pas les mêmes que ceux développés pour le bâtiment.

Le développement de modèles énergétiques se fait relativement au même moment que pour le bâtiment. Dans les années 1980, les premiers modèles de types « boîte noire » (qui établissent des relations mathématiques entre entrées et sorties sans fondement théorique) (Udink ten Cate, 1983) ont été développés. Dans les années 1990, un des premiers modèles basés sur des bilans énergétiques et massiques est développé (De Zwart, 1996). Ce modèle est calibré avec une serre vitrée cultivant des tomates aux Pays-Bas et permet l'analyse de mesures d'efficacité énergétique. Le modèle de De Zwart (1996) est par la suite repris par Vanthoor, Stanghellini, Van Henten, et De Visser (2011) afin de développer une méthodologie plus complète de conception et dimensionnement de serres pour n'importe quel emplacement géographique.

Ces outils restent toutefois des modèles mathématiques et ne sont pas développés pour devenir des logiciels comme dans le domaine du bâtiment. Leur analyse est plus précise pour la culture en serre puisqu'ils modélisent la croissance des plantes et les échanges thermiques et massiques entre les plantes et l'environnement. Toutefois, ces modèles deviennent beaucoup moins pratiques et précis lorsque la serre est intégrée à un bâtiment et ne peuvent pas modéliser d'espace d'agriculture intégrée au bâtiment (eAIB).

La section suivante présente de nouvelles approches proposées qui intègrent les outils développés par les deux domaines.

1.2.3 Simulation d'espace d'agriculture intégré au bâtiment (eAIB)

Tel que mentionné précédemment, les modèles mathématiques développés en serriculture manquent de flexibilité pour effectuer des analyses énergétiques d'espaces d'agriculture intégrés au bâtiment (eAIB). Certains chercheurs ont plutôt essayé d'adapter les outils de simulation de la performance du bâtiment (SPB) pour intégrer l'analyse des plantes développée dans le domaine agricole (Kokogiannakis & Cooper, 2015; Ward, Choudhary, Cundy, Johnson, & McRobie, 2015).

Comme les logiciels de simulation de la performance de bâtiments servent entre autres à déterminer les gains thermiques attendus, il est important qu'ils puissent modéliser avec précision l'ensemble de ces derniers, du moins les plus importants. Dans une application agricole, une serre par exemple, les gains des plantes peuvent être significatifs, mais sont complètement négligés dans les analyses et les conceptions actuelles (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2015). Cependant, Ward et al. (2015) ainsi que Kokogiannakis et Cooper (2015) ont récemment développé des modules de simulation de plantes pour les logiciels TRNSYS et ESP-r, respectivement. Ward et al. (2015) ont repris les travaux de Vanthoor et al. (2011) et de De Zwart (1996) afin de développer un module de simulation de plantes pour le logiciel TRNSYS (type ou composante).

Kokogiannakis et Cooper (2015) développent quant à eux leur propre modèle d'évapotranspiration à partir des travaux de Monteith (1981) et de Allen, Pereira, Raes, et Smith (1998). Il est à noter que les équations de Penman-Monteith (Monteith, 1981) sont également utilisées dans les travaux de De Zwart (1996). La principale différence entre les deux composantes de plantes intégrées aux outils de SPB (d'un point de vue gains thermiques) est que les modèles de Vanthoor et al. (2011) et de De Zwart (1996) sont développés principalement pour la tomate de serre et ont été validés expérimentalement alors que les équations de Penman-Monteith et de Allen et al. (1998) sont des approches théoriques applicables à toute sorte de plantes : ce ne sont pas des modèles validés expérimentalement pour les tomates. La Figure 1.2 retrace les développements effectués dans les modèles de plantes repris par ces auteurs.

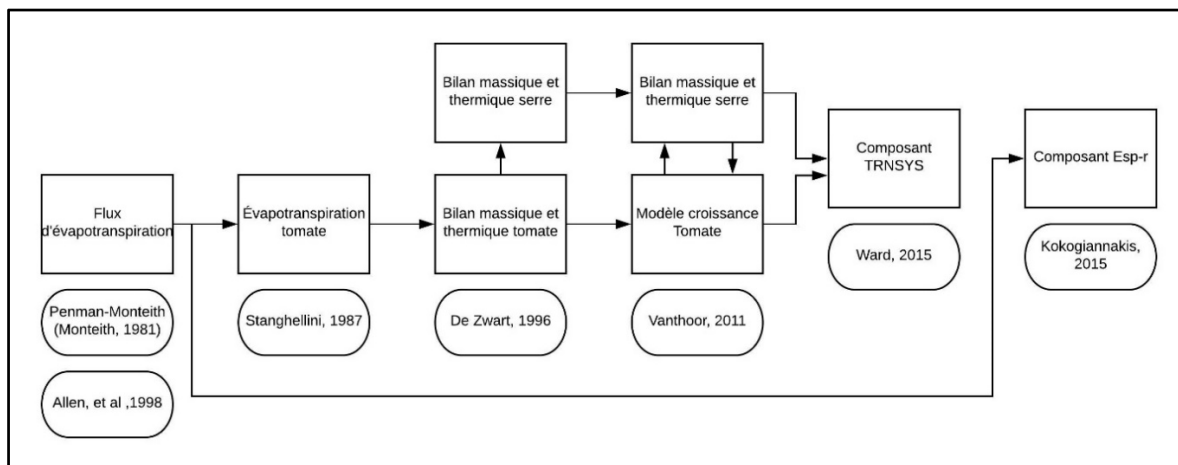


Figure 1.2: Historique du développement de modèles de simulation de plantes

Les travaux de Ward et al. (2015) et de Kokogiannakis et Cooper (2015) permettent de mieux comprendre les interactions entre les plantes et leur environnement ainsi que les interactions possibles entre les espaces de cultures et les espaces habités et aident à mieux dimensionner et opérer les systèmes de conditionnement de l'air. De récents travaux reprennent d'ailleurs le modèle de Ward dans des simulations d'eAIB (Talbot & Monfet, 2018). Ces travaux mettent en lumière que certains aspects du modèle ne fonctionnent pas correctement (croissance des

plantes) et que son utilisation requiert de très petits pas de temps (1 sec) et alourdit les simulations annuelles. Toutefois, ils concluent également que les gains thermiques des plantes sont non-négligeables et devraient être inclus dans le dimensionnement et l'analyse de la consommation énergétique d'équipements de chauffage, ventilation et conditionnement d'air (CVCA).

En Espagne, une équipe de chercheurs a utilisé EnergyPlus afin de calibrer une serre passive intégrée au bâtiment (Nadal et al., 2017). La Figure 1.3 présente la serre et son bâtiment.

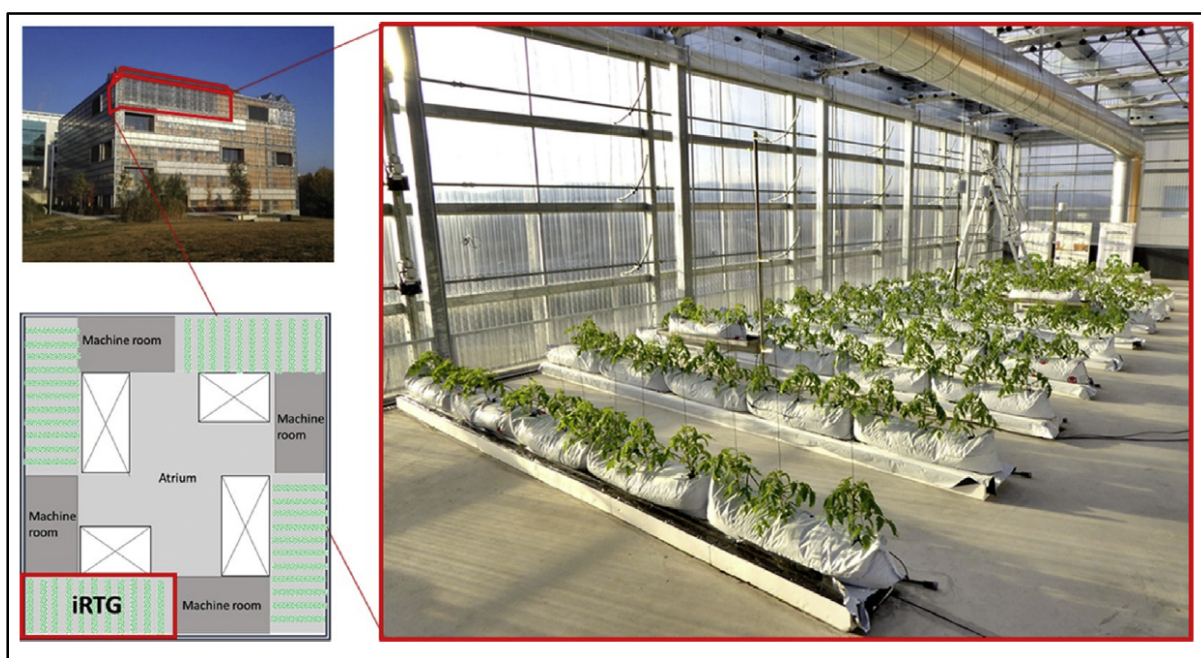


Figure 1.3: Serre passive intégrée au bâtiment de l'Institut d'Environnement de Science et de Technologie et de l'Institut Catalan de Paleontologie (Nadal et al., 2017)

Les gains latents des plants de tomates ont été intégrés en programmant les équations empiriques de Bonachela, González, et Fernández (2006) pour des plants en terreau à l'intérieur de serres méditerranéennes. La programmation a été effectuée directement dans le logiciel EnergyPlus avec l'outil Système de Management de l'Énergie (EMS en anglais). Nadal et al. (2017) ont réussi à calibrer la serre avec des données sur la température et l'humidité.

Leur modèle avait une erreur de biais moyenne (MBE) inférieure à $\pm 10\%$ et une erreur moyenne quadratique (RMSE) inférieure à 30% avec des données horaires. Ils ont par la suite comparé la consommation énergétique attendue en déplaçant l'espace au sol.

Ils admettent toutefois que le modèle obtenait ses plus grandes erreurs lors de grands écarts de température entre l'intérieur de la serre et l'extérieur. Cette condition est présente presque toute l'année dans un climat québécois. Également, les lignes directrices de ASHRAE (2002) mentionnent que la MBE et la RMSE devraient être inférieures à $\pm 10\%$ et 30% pour la consommation énergétique plutôt que les températures. Leur calibration a été effectuée uniquement sur la température et l'humidité (puisque c'est une serre passive) et les équations utilisées pour les gains des tomates ne sont valables que pour des serres méditerranéennes.

Benis et al. (2017) ont également utilisé EnergyPlus pour modéliser des espaces d'agriculture intégrés au bâtiment. Ils ont modélisé et comparé 4 espaces d'agriculture pour une ville du Portugal : (1) une serre passive sur toit inspiré des travaux de l'équipe de chercheurs en Espagne (Sanyé-Mengual et al., 2015), (2) une serre sur toit « haute performance » avec système hydroponique, (3) un espace d'agriculture intégré au bâtiment avec éclairage naturel et électrique, (4) un espace d'agriculture intégré au bâtiment avec éclairage électrique uniquement. Ils ont également repris les travaux de Vanthoor et al. (2011) pour estimer la consommation en eau et la production des plants de tomates. Les gains thermiques des plants n'ont toutefois pas été intégrés aux modèles. Également, aucune calibration n'a été effectuée dans cette étude.

En résumé, les outils de simulation de la performance des bâtiments semblent être le choix le plus prometteur pour la modélisation d'espaces d'agriculture intégrés au bâtiment. En effet, ils permettent l'intégration des travaux effectués dans le domaine de l'agriculture pour l'estimation des gains thermiques et des productions attendues des plantes. Certaines opportunités de recherche peuvent également être identifiées. Une seule calibration de serre avec des outils de SPB a été recensée et c'est pour une serre passive en Espagne. La calibration sur les consommations énergétiques d'une serre contrôlée dans un climat plus froid comme

celui du Québec reste encore à démontrer. Également, l'intégration des gains thermiques des plantes n'a pas encore d'approche généralisée. Certaines études les négligent encore.

1.3 Analyse du cycle de vie (ACV)

Les méthodes d'évaluation du cycle de vie, de manière générale, visent à quantifier des impacts sur tout le cycle de vie d'un produit. Selon le type d'impact à quantifier, trois types d'approches peuvent être distinguées : les analyses des coûts sur le cycle de vie (ACCV) (ISO, 2008), l'analyse environnementale du cycle de vie (ACV) (ISO, 2006a) et les plus récentes analyses sociales sur le cycle de vie (ASCV). Cette recherche met l'accent sur les impacts environnementaux et cette section présente un survol de la méthodologie de l'ACV environnementale. S'en suit une brève revue de littérature d'études de cas en agriculture ayant eu recours à cette approche.

Afin de permettre une meilleure rigueur et fiabilité des ACV, des processus de normalisation ont commencé à voir le jour dans les années 90. Les normes ISO 14040 (ISO, 2006a) et ISO 14 044 (ISO, 2006b) dressent les différents cadres, terminologies et méthodologies de l'ACV. Ces travaux n'ont jamais visé la normalisation d'une seule méthodologie d'ACV, mais plutôt la convergence et l'harmonisation des différentes méthodes. Le schéma du cadre méthodologique général proposé par ISO (2006a) présenté à la Figure 1.4 est un bon exemple des résultats visés par leur processus de normalisation.

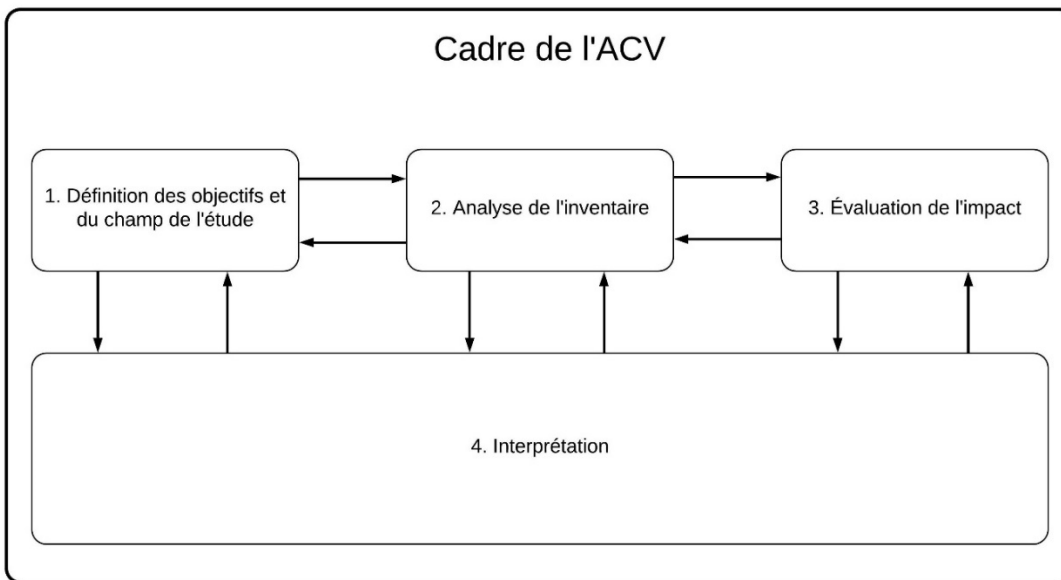


Figure 1.4: Cadre méthodologique d'ACV adapté d'ISO (2006a)

1.3.1 Étapes de l'ACV

L'ordre des étapes d'une ACV est donné par la numérotation. Les flèches à double sens servent à indiquer qu'un travail d'analyse et de rétrospection des résultats de chaque étape est nécessaire afin de raffiner l'analyse (Figure 1.4). Il s'agit donc d'une approche itérative.

La première étape est la définition des objectifs et du champ de l'étude. Les objectifs à définir sont principalement les raisons qui motivent la réalisation de l'ACV, l'application envisagée de l'étude et le public concerné. Une ACV comparative destinée à guider des politiques gouvernementales n'est pas réalisée de la même façon qu'une ACV d'un produit au sein d'une entreprise visant une amélioration de ses procédés. La définition du champ de l'étude consiste à déterminer ce qui est analysé et comment c'est analysé. Plusieurs éléments doivent être définis à cette étape notamment : l'unité fonctionnelle, les frontières du système, les hypothèses et limitations, etc. L'unité fonctionnelle est la quantification de la fonction du système pour permettre la comparaison d'un système à l'autre pour une même fonction. Par

exemple, les productions d'électricité éolienne et solaire pourraient être comparées en ramenant les inventaires et les impacts sur un kWh d'énergie produite. Les frontières servent à décrire les processus qui sont inclus ou exclus de l'analyse soit parce qu'ils sont négligeables ou identiques d'un scénario à l'autre.

La seconde étape d'une ACV est l'analyse de l'inventaire du cycle de vie. C'est la quantification des ressources requises et des émissions à l'environnement pour l'ensemble des processus et des étapes du cycle de vie du système étudié, mis à l'échelle de l'unité fonctionnelle. Cette étape est généralement facilitée par l'utilisation d'une base de données comme ecoinvent qui possède déjà de nombreux processus, par exemple la production d'un kWh d'hydroélectricité au Québec.

La troisième étape est l'évaluation des impacts. Cette étape requiert l'utilisation de méthodes de modélisation environnementale qui permettent de quantifier les impacts que l'inventaire du système peut avoir sur certains problèmes environnementaux (mid-point, ex : réchauffement climatique, acidification des terres, épuisement de la couche d'ozone, toxicité humaine, etc.) ou certaines catégories de dommages plus globales (end-point, ex : santé humaine, qualité des écosystèmes, etc.). Ces méthodes d'impact utilisent des modèles représentant les chaînes de cause à effet entre l'inventaire des ressources utilisées et de polluants émis et les catégories d'impacts analysés.

La dernière étape est l'interprétation des résultats. Cette étape se fait avec une rétrospection des trois premières étapes. En effet, un changement effectué à chacune de ces étapes peut avoir des impacts significatifs sur la tendance des résultats. Une analyse de sensibilité peut être effectuée à cette étape pour renforcer la confiance dans les résultats. Pour des ACV comparatives, la norme ISO 14044 (ISO, 2006b) recommande d'éviter les pondérations lors de la présentation de résultats. En d'autres mots, un scénario ne peut être considéré comme meilleur ou gagnant sur d'autres seulement si ses impacts pour l'ensemble des catégories analysées sont inférieurs aux autres scénarios.

1.3.2 ACV tomate de la tomate

L'ACV a été utilisée extensivement pour déterminer l'impact environnemental de différents produits agricoles. Les objectifs varient d'une étude à l'autre et selon l'échelle sociétale analysée. En effet, certaines études visent à guider les politiques alimentaires ou les choix des consommateurs vis-à-vis leurs habitudes alimentaires (Corrado, Luzzani, Trevisan, & Lamastra, 2019; Esteve-Llorens, Darriba, Moreira, Feijoo, & González-García, 2019; Sonesson, Davis, Hallström, & Woodhouse, 2019). Parfois, elles sont plus orientées sur le produit et visent à identifier les points chauds afin de diminuer l'empreinte environnementale de la production (Antón, Castells, Montero, & Muñoz, 2004). Dans le cadre de cette étude, les études orientées sur la production agricole sont celles qui seront les plus pertinentes. Comme les impacts environnementaux varient énormément en fonction de la localisation géographique de la production, mais aussi des types de technologies employées, le Tableau 1.2 catégorise les niveaux technologiques des serres étudiées dans les publications recensées. Le Tableau 1.3 présente un sommaire des études récentes ayant réalisé une ACV pour le produit de la tomate.

Tableau 1.2: Définition du niveau technologique des serres étudiées

Types de serres	Caractéristiques
Low tech	Ventilation naturelle uniquement
Med tech	Chauffage et ventilation naturelle
High tech	Chauffage, éclairage, ventilation naturelle et mécanique, automatisation

Tableau 1.3: Sommaire des ACV de la tomate

Auteur	Emplacement	Température moyenne annuelle [°C]	Niveau technologique	Production [kg m⁻² an⁻¹]	Processus exclus	Méthode d'impact	GWP [kg CO₂ eq kg tomate⁻¹]	Processus plus contributeurs
(Canakci & Akinci, 2006)	Antalya, Turquie	18.2	Med-Tech	18.9		Embodied energy	N/A	Chauffage au bois
(Medina, Cooman, Parrado, & Schrevens, 2006)	Bogota, Colombie	12.5	Low-Tech	26	Déchets	CED	N/A	Nutriments, irrigation
(Muñoz et al., 2008)	Barcelone, Espagne							
(Boulard et al., 2011)	Sud de la France					Midpoints:		
	Sud de la Vallée du Rhône et Catalogne	13.1 (Vallée du Rhône) – 15.7 (Catalogne)	Low-Tech	15		CED, IPCC, EDIP, CML01, IMPACT2002+	0.508	Production (fertilisants, irrigation, grains, pesticides)
	Nord de la France Bretagne et Sud de la Vallée de Loire	7.9 (Bretagne)- 11.8 (Vallée de Loire)	Med-Tech	40-50			1.62-2.36	Chauffage gaz naturel

Tableau 1.3: Sommaire des ACV de la tomate (suite)

Auteur	Emplacement	Température moyenne annuelle [°C]	Niveau technologique	Production [kg m ⁻² an ⁻¹]	Processus exclus	Méthode d'impact	GWP [kg CO ₂ eq kg tomate ⁻¹]	Processus plus contributeurs		
(Page, Ridoutt, & Bellotti, 2012)	Sydney, Australie	18.5	Low-Tech	16		Midpoints: IPCC, Fresh water Consumption (Pfister, Saner, & Koehler, 2011)	0.43			
			Med-Tech	34		Endpoints: ECO-Indicator 99	1.71	Chauffage gaz naturel		
			High-Tech	57			1.86	Chauffage gaz naturel		
(Torrellas et al., 2012)	Almeria, Espagne	18.5	Low-tech	16,5	Packaging	Midpoint : CED, CML2001	0.25	Structure serre		
	Hongrie	11.2	High-tech	48			0.44-5	Chauffage gaz naturel		
	Pays-Bas	9.6	High-tech	56,5			0.78-2	Chauffage gaz naturel		
(Bojacá, Wyckhuys, & Schrevens, 2014)	Alto Ricaurte, Colombie	19.6	Low-Tech	3.97-28.57	packaging	Midpoint CML2001	0.74	Infrastructure, fertilisation, déchets		

Tableau 1.3: Sommaire des ACV de la tomate (suite)

Auteur	Emplacement	Température moyenne annuelle [°C]	Niveau technologique	Production [kg m ⁻² an ⁻¹]	Processus exclus	Méthode d'impact	GWP [kg CO ₂ eq kg tomate ⁻¹]	Processus plus contributeurs
(Payen, Basset-Mens, & Perret, 2015)	Moroco, Afrique du Nord (importé en France)	18.9	Low-Tech	18-23.4		Midpoint ReCiPe, CED, Fresh water Consumption	0.22 farm gate 0.55 market gate (France)	Transport, Culture (Fertilisants, irrigation) Infrastructures
(Sanyé-Mengual et al., 2015)	Barcelone, Espagne	15.3	Low-Tech RTG	25		Midpoints, ReCiPe, CED	0.216 0.237	Infrastructure serre, fertilisants Infrastructure serre, fertilisants
	Almeria, Espagne		Low-Tech					
(Goldstein et al., 2016)	Boston, ÉU	10.7	High-Tech RTG	70		Consequential LCA ILCD Method	2.15 0.26 1.58 0.07-0.08	Chauffage gaz naturel Infrastructure serre Infrastructure serre Infrastructure serre
	Boston, ÉU		Low-Tech RTG					
	Boston, ÉU		Med-Tech					
	Boston, New-York, ÉU		Low-Tech					
(Dias et al., 2017)	Leamington, Ontario, Canada	9.5	High-Tech	56.4		Midpoint TRACI 2.1, CED 1.08, ReCiPe 1.07	3.2	Chauffage gaz naturel/huile, Packaging

La revue de ces études indique qu'il n'existe pas de méthode de caractérisation des impacts environnementaux dont l'utilisation est généralisée pour l'analyse de la production de la tomate. La méthode ReCiPe revient un peu plus souvent, mais ce sont principalement les mêmes groupes de chercheurs qui l'utilisent. Cependant, pratiquement toutes les études présentaient les impacts sur les changements climatiques (global warming potential) et la quantité d'énergie primaire utilisée (Cumulative energy demand). Ces indicateurs sont les plus utilisés lors d'analyse comparative ou de comparaison avec d'autres études.

La plupart des études sont de type berceau à la porte et excluent la commercialisation et le transport au consommateur. Certaines études font toutefois l'analyse du transport dans la comparaison entre une production locale et l'importation (Goldstein et al., 2016b; Page et al., 2012; Payen et al., 2015). Page et al. (2012) et Payen et al. (2015) observent une concession réciproque entre les empreintes carbone et les empreintes sur la consommation d'eau des productions locales et importées. Les productions locales dans les villes comme Saint-Charles (France) et Sydney (Australie) ont tendance à utiliser des combustibles pour chauffer les serres et atteindre des rendements plus élevés. Leurs impacts sur les changements climatiques sont ainsi plus élevés que les produits importés qui n'utilisent pas de chauffage. En effet, la contribution du transport par rapport au chauffage n'est pas aussi prononcée pour la catégorie de changements climatiques (30-40% vs 80-90%). Plus le niveau technologique des serres est élevé, plus la consommation énergétique de la production et les impacts environnementaux associés sont élevés. Ce type de serres se retrouve également plus souvent dans les climats plus froids. La Figure 1.5 illustre cette analyse.

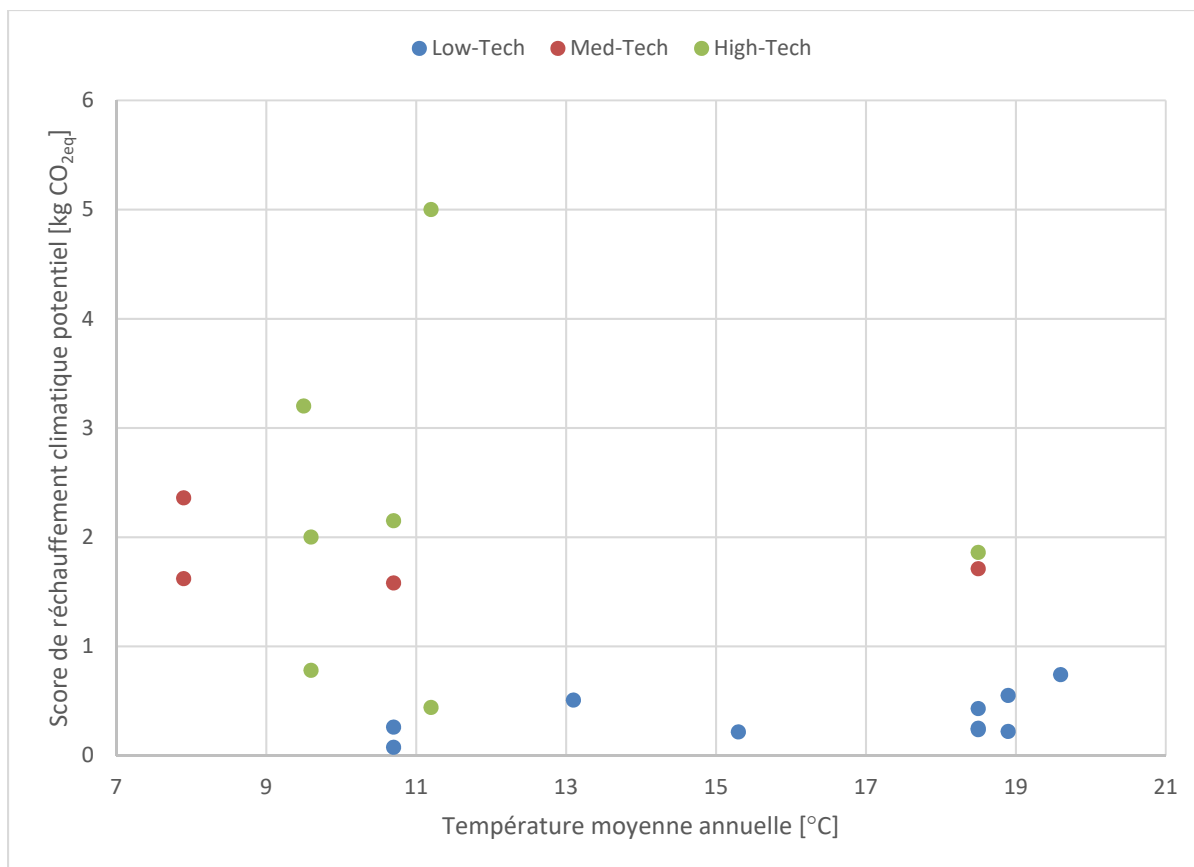


Figure 1.5: Catégorisation des scores de réchauffement climatiques selon la température et le niveau technologique pour 1 kg de tomate.

Dès qu'il y a du chauffage utilisé dans une serre, c'est immédiatement le processus le plus contributeur aux changements climatiques et parfois à d'autres catégories d'impact également. À noter que ce n'est pas nécessairement la demande en chauffage qui engendre de gros impacts, mais plutôt la source énergétique utilisée. Dans la majorité des cas, ce sont des combustibles fossiles. Les analyses de sensibilité sur le type d'énergie de chauffage utilisé réalisées par Torrellas et al. (2012) et Goldstein et al. (2016b) abondent effectivement en ce sens. En changeant de source énergétique pour des puits géothermiques ou de l'hydroélectricité, il serait possible de réduire jusqu'à 90% des impacts sur les changements climatiques. Ces variabilités rendent d'autant plus pertinente la réalisation d'une ACV de la tomate pour un contexte

énergétique québécois. À ce jour, aucune ACV de la production de la tomate au Québec n'a été publiée.

Comme pour le domaine de la simulation énergétique, les études récentes ayant fait l'analyse de scénarios d'agriculture intégrée aux bâtiments soulignent le peu de données et d'études dans ce domaine émergent et ont dû appuyer leurs analyses sur de nombreuses hypothèses (Goldstein et al., 2016b; Sanyé-Mengual et al., 2015). L'utilisation d'outils de SPB pour la génération d'hypothèses de consommation énergétique d'eAIB telle que proposée par Benis et al. (2017) serait un bon point de départ pour une ACV de la tomate en eAIB dans un contexte énergétique québécois.

1.4 Constats

À la suite de la revue de littérature effectuée dans les domaines de la culture en environnement contrôlé, en modélisation énergétique et en analyse du cycle de vie certains constats peuvent être dressés.

La tomate est l'un des produits agricoles les plus étudiés en ACV. Les impacts environnementaux de sa production dépendent énormément du niveau technologique des serres, mais également des contextes énergétiques où elles sont produites. Aucune ACV de la tomate du Québec n'a été recensée.

Les eAIB sont de plus en plus discutés, mais peu de données sont disponibles pour l'évaluation de leurs impacts environnementaux. Uniquement deux études effectuant l'ACV de tels systèmes ont été recensées (Goldstein et al., 2016b; Sanyé-Mengual et al., 2015) et ces dernières utilisaient des hypothèses pour les inventaires de consommation énergétique. La génération de données énergétiques avec des outils de SPB permettrait la réalisation d'une ACV comparative pour différents scénarios d'agriculture en environnement contrôlé dans un contexte énergétique québécois.

Afin d'augmenter la confiance dans l'utilisation d'outils de SPB pour la modélisation d'espace d'agriculture, il serait pertinent de réaliser la calibration d'une serre contrôlée dans un climat ayant de grands écarts de température comme le Québec. Un modèle calibré permettrait l'évaluation de certaines mesures d'économie d'énergie les plus citées dans la littérature et l'actualisation des analyses économiques dans le contexte énergétique actuel. Cela donnerait également plus de confiance pour l'évaluation des gains thermiques des plantes dont les modèles ont récemment été intégrés dans les outils de SPB.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

2.1 Objectifs

Afin de réduire au maximum les impacts de la culture en environnement contrôlé en ville, il est important d'identifier les processus les plus contributeurs et les différents paramètres clés qui ont une grande sensibilité sur les impacts. Ce genre d'analyse paramétrique peut être facilitée par l'utilisation d'outils d'analyse environnementale et d'outils de simulation de la performance de bâtiment. L'objectif général de cette étude est de comparer les impacts environnementaux potentiels, en utilisant l'ACV, de différents espaces d'agriculture en environnement contrôlé pouvant s'intégrer en ville, et ce dans le contexte énergétique québécois.

Les domaines du bâtiment et de l'agriculture ont tous les deux parallèlement développé des méthodes de simulation énergétique des bâtiments et des serres. L'utilisation d'un seul outil rend plus rigoureuse la comparaison de différents scénarios technologiques. L'intégration d'espaces d'agriculture dans les bâtiments dans ces outils de simulation n'a toutefois été envisagée dans aucun domaine jusqu'à récemment. S'il est impossible de modéliser un espace de culture dans un bâtiment avec un outil de simulation de serre, il est possible de modéliser une serre avec un outil de simulation de la performance des bâtiments (SPB). Certaines études récentes en bâtiment tentent d'intégrer la simulation des plantes dans les bâtiments, mais les méthodes proposées sont encore exploratoires. La calibration d'un modèle de serre avec un outil de simulation de la performance du bâtiment permettra de renforcer la confiance pour ce genre d'analyse et permettra également l'analyse de certaines mesures d'économie d'énergie.

Les projets d'espaces d'agriculture en environnement contrôlé intégrés aux bâtiments sont assez récents et peu nombreux au Québec. Dans le cadre de ce travail, les données d'entrées des simulations de la performance de bâtiment pour ces scénarios proviennent d'hypothèses basées sur la littérature. Grâce au partenariat avec Quartier Nourricier, le scénario de la serre sur sol est tiré d'une étude de cas réel. Cela permet la calibration du modèle et l'analyse de l'efficacité de mesures d'économie d'énergie.

Plus spécifiquement, les sous-objectifs de cette étude sont :

1. Calibrer un modèle de serre avec des outils de simulation de la performance des bâtiments (SPB) et évaluer les impacts de mesures d'économie d'énergie;
2. Évaluer les impacts environnementaux de la culture de la tomate pour différents bâtiments;
3. Analyser l'impact de certains paramètres clés ou caractéristiques comme le type de chauffage utilisé, le transport, la charge thermique des plantes, etc.

2.2 Méthodologie

Cette section présente la méthodologie générale employée dans cette étude ainsi que les caractéristiques spécifiques aux différentes étapes.

Le premier objectif de la recherche est abordé dans le CHAPITRE 3. Les données d'opération de la serre récemment construite dans le quartier Centre-Sud à Montréal ont permis la calibration d'un modèle de la performance de leur serre. Les données des températures internes récoltées toutes les 30 secondes ainsi que les consommations mensuelles de gaz sont utilisées pour calibrer le modèle généré avec le logiciel OpenStudio V.2.5 (Guglielmetti, Macumber, Long, 2011) conformément aux lignes directrices du guide 14-2002 de l'ASHRAE (2002). Les données sur l'enveloppe et la structure sont tirées des plans de construction et les débits de ventilation naturelle sont estimés à partir des équations de Bernoulli simplifiées (CIBSE 2005). L'analyse économique des mesures d'économie d'énergie tirées de la littérature est réalisée avec la méthode de valeur actualisée nette telle que décrite par l'ASHRAE (2007).

Le CHAPITRE 4 aborde les deux derniers objectifs de la recherche. L'outil utilisé pour l'analyse environnementale de cette étude est l'analyse environnementale du cycle de vie (ACV). L'ACV est réalisée conformément aux normes ISO 14040 et 14044 (ISO, 2006a, 2006b). L'ACV est de type attributionnel « berceau à la porte ». Les processus inclus débutent ainsi à l'extraction des matières pour la production de matériaux, de systèmes et d'intrants énergétiques et s'arrêtent à la porte du producteur, avant la livraison du produit. L'unité fonctionnelle est la production de 1 kg de tomate aux portes de l'espace d'agriculture. La méthode d'impact utilisée est Impact 2002+ avec catégories de dommages endpoint. Les phases de transport et d'utilisation de la tomate (réfrigération) sont exclues de cette étude. Les autres intrants requis pour la production (infrastructures, systèmes, irrigation, énergie, etc.) sont considérés en tenant compte de toutes leurs phases de cycle de vie, soit de l'extraction des matières à la gestion de fin de vie. Les données d'inventaire pour les processus de la production de la tomate (irrigation, fertilisants, etc.) sont tirées d'un processus existant dans la base de données ecoinvent : *tomato production, fresh grade, in heated greenhouse* | *tomato, fresh grade* | *Cutoff, UNL*. Les quatre scénarios étudiés sont : (1) une serre traditionnelle sur sol; (2) une serre sur toit; (3) un eAIB avec éclairage naturel et électrique (4) un eAIB avec éclairage électrique uniquement, qui sont soit chauffées au gaz dans le cas des serres ou climatisées avec des systèmes électriques pour les eAIB. Ces modes de production étant assez récents, peu de données primaires sont disponibles pour effectuer leur analyse. Des simulations de la performance de bâtiment de cas typiques sont donc réalisées en s'inspirant de la méthodologie suggérée par Benis et al. (2017). Les consommations énergétiques du processus tiré d'ecoinvent sont modifiées pour représenter les consommations estimées par les modèles générés avec OpenStudio. Ces modèles intègrent les gains thermiques des plants de tomate en reprenant les travaux de Ward et al. (2015) et de Talbot & Monfet (2018). Une analyse de sensibilité est ensuite effectuée sur les gains thermiques des plantes, les sources énergétiques, le transport et le type d'éclairage.

La Figure 2.1 résume la méthodologie générale de la recherche. Plus de détails sur les hypothèses et choix méthodologiques sont présentés dans les chapitres suivants.

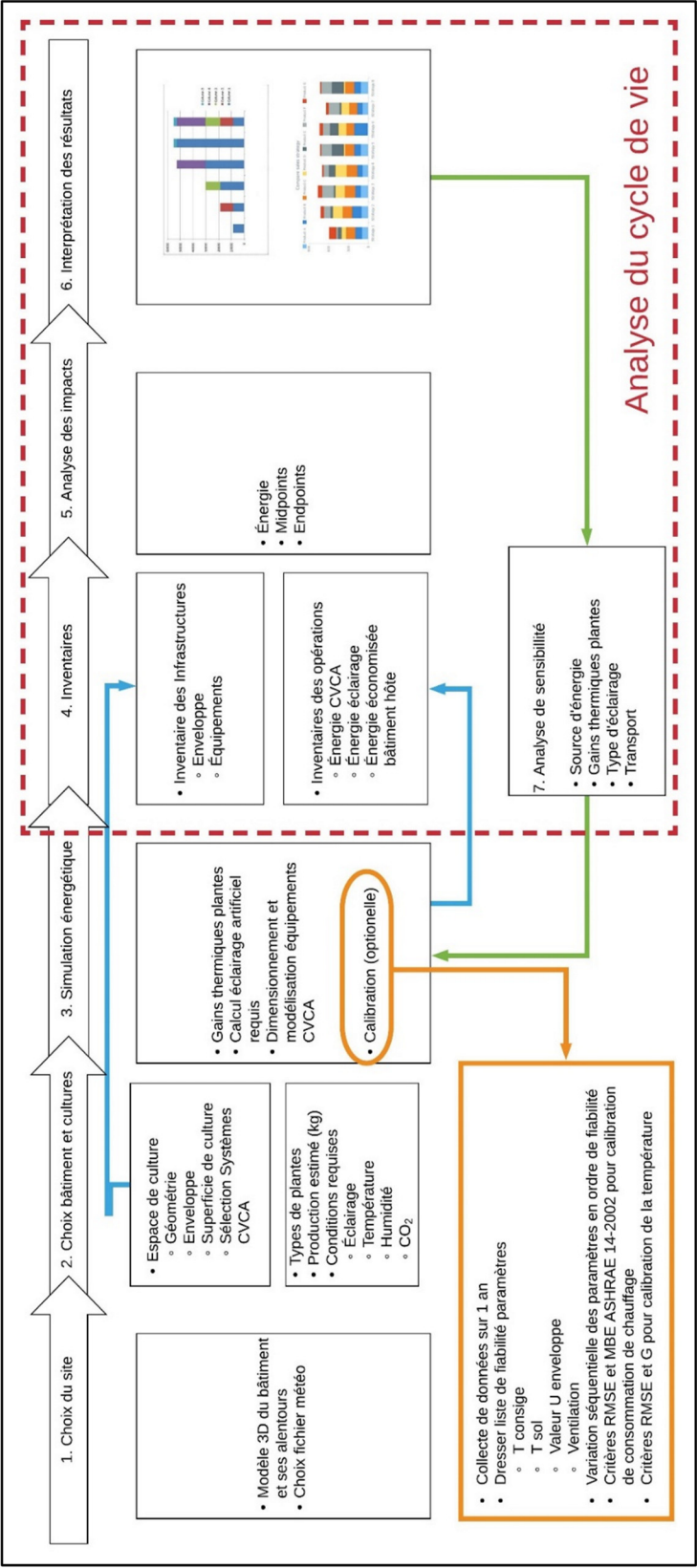


Figure 2.1: Schéma de la méthodologie de recherche

CHAPITRE 3

CALIBRATION D'UN MODÈLE ÉNERGÉTIQUE D'UNE SERRE ET ANALYSE DE MESURES D'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE

Cette section résume un article de conférence publié dans le compte-rendu de la conférence eSim (Léveillé-Guillemette et Monfet, 2018), présenté à l'ANNEXE I. Tel que discuté dans les constats à la section 1.4, l'utilisation d'outils de simulation de la performance du bâtiment pour l'estimation des consommations énergétiques d'espaces d'agriculture en environnement contrôlé semble être une avenue prometteuse. En effet, l'utilisation d'énergie de chauffage est l'une des premières dépenses des agriculteurs en serre au Québec (SPSQ, 2011). La calibration d'un modèle de serre permet notamment d'évaluer plusieurs scénarios d'économie d'énergie. De plus, une calibration rigoureusement effectuée et se conformant aux lignes directrices de l'ASHRAE (2002) permet de renforcer la confiance dans les estimations de consommation d'énergie qui sont utilisées aux étapes subséquentes de cette recherche. L'objectif de cet article répond au premier sous-objectif de cette recherche soit : calibrer un modèle de serre avec des outils de simulation de la performance des bâtiments (SPB) et évaluer les impacts de mesures d'économie d'énergie. L'outil utilisé pour la simulation énergétique et la calibration est Open Studio V 2.5 (Guglielmetti et al., 2011)

La serre utilisée pour cette étude est une serre communautaire récemment construite à Montréal et dotée d'un système de contrôle permettant l'acquisition de données notamment sur les températures, le contrôle du chauffage et l'ouverture des volets. C'est une serre de petite superficie (7.62 m X 15.24 m d'une hauteur de 3.66 m) avec une orientation Est-Ouest de sa longueur. Sa structure d'acier est ancrée au sol dans une semelle de béton et son enveloppe est du polyéthylène double-parois soufflée à l'air. Les demandes en chauffage sont comblées par un brûleur au gaz et le refroidissement se fait par l'ouverture automatisée des volets. Les gains thermiques des plantes sont négligés dans le modèle puisque la densité de culture de la serre étudiée est très faible (la serre est davantage utilisée de façon éducative que productive).

Suivant la méthodologie proposée par Raftery, Keane et al. (2011), les paramètres dont la fiabilité des données est la plus faible pour le modèle de la serre sont :

- La température de consigne;
- La température du sol;
- Le coefficient de transfert thermique de l'enveloppe (U);
- Les débits de ventilation naturelle.

Ces paramètres sont variés de façon séquentielle afin d'obtenir la meilleure réponse sur trois critères : (1) le plus faible coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CV-RMSE) entre les consommations de gaz simulées et réelles; (2) la plus faible erreur de biais moyenne normalisée (NMBE) entre les consommations; (3) le plus grand goodness of fit (G) des courbes de températures simulées et réelles. Conformément aux lignes directrices du guide 14-2002 de l'ASHRAE (ASHRAE, 2002), la calibration est jugée satisfaisante pour un CV-RMSE inférieur à $\pm 15\%$ et un NMBE inférieur à $\pm 5\%$ pour une calibration avec des données mensuelles. Le Tableau 3.1 présente les principaux résultats de la calibration.

Tableau 3.1 Principaux résultats de la calibration de la serre

Version	T _{in} [C°]		Consommation de gaz [J]	
	RMSE	G	CVRMSE	NMBE
V1 pré calibration	1.8	54.9	53.4 %	39.7 %
V4 calibrée	1.3	66.9	14.7 %	-0.9 %

Après la modification des quatre paramètres, le RMSE sur la température interne est diminué de 28%, le G est augmenté de 22% et les critères du guide 14-2002 pour des consommations mensuelles sont respectés.

Une fois la calibration effectuée, plusieurs mesures de conservation d'énergie (MCE) sont testées et la valeur actualisée de leur période de retour sur investissement (PRI) est estimée. Le Tableau 3.2 résume les principaux résultats de cette analyse.

Tableau 3.2 Résultats d'analyse de MCE sur la serre

<i>Mesure</i>	Sensibilité	Économies	Investissement	PRI
	-	[% kWh]	[\$]	[ans]
<i>Isolation mur Nord</i>	5-10 cm polystyrène	7 %-8 %	537-923	9-16
<i>Rideaux thermiques</i>	Jusqu'à 30% économies énergie	13 %-30 %	4872	20-39
<i>Mur de masse</i>	Sans/Avec coûts main d'œuvre	5 %	640-1300	16-28
<i>Serre sur toit</i>	Structure lourde/légère et économies bâtiment	23 %-30 %	5000-76000	20-126

Les mesures avec la meilleure PRI ne sont pas les mesures avec le plus grand potentiel d'économie d'énergie, mais simplement les mesures avec les plus faibles coûts. Ainsi, bien que l'isolation du mur nord ou l'ajout d'un mur de masse ne permettent qu'entre 5 et 8% d'économie d'énergie comparativement à 13% à 30% pour la construction sur toit ou l'ajout de rideaux thermiques, leur PRI sont jusqu'à deux fois plus rapide (entre 9 et 16 ans vs 20 ans minimum). Il est à noter que l'analyse économique est des plus conservatrice puisque les coûts du gaz utilisés sont sous la valeur marchande actuelle (moyenne des cinq dernières années) et ne tiennent compte que de la consommation et négligent les autres frais (distribution, transport, équilibrage, etc.). Toutefois, les résultats obtenus illustrent bien la différence d'impacts que les mesures citées dans la littérature peuvent avoir sur une serre de petite superficie dans un climat québécois. Il semble plus rentable pour des petites serres de miser

davantage sur l'intégration de techniques de conception passives que sur l'addition d'éléments mécaniques coûteux comme des rideaux thermiques.

CHAPITRE 4

GREENHOUSE VERSUS BUILDING-INTEGRATED AGRICULTURAL SPACE (BIAS) IN QUEBEC: COMPARISON USING BUILDING PERFORMANCE SIMULATION AND LIFE CYCLE ASSESSMENT

Frédéric Léveillé-Guillemette ^a, Danielle Monfet ^b, Annie Levasseur ^c

^{a,b,c} Département de Génie de la construction, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis pour publication dans « Journal of Cleaner production », 9 juillet 2019

Abstract

Increases in demand for food production, denser cities and climate change are often discussed to explain the ever-rising interest in urban agriculture. There are several ways production can proceed in cities, each having very different environmental impacts, depending on the climate, building type, energy sources and technologies used. In this paper, a comparative life cycle assessment (LCA) of tomato production within a protected agricultural space in Montreal (Canada) was performed. This is one of the first such studies to cover the energy context in the province of Quebec. Four scenarios were compared: (1) a plastic greenhouse on the ground, (2) a rooftop greenhouse, (3) a building-integrated agriculture space (BIAs) with natural and electric lighting, and (4) a BIAs with electric lighting only. The LCA included the energy consumption of the spaces, which was estimated using building performance simulation (BPS) tools. For the studied scenarios, the global warming potential score varied between 0.62 and 2.79 kg CO_{2eq} kg tomato⁻¹. None of the scenarios obtained a high score in all endpoint categories, but the rooftop greenhouse and the BIAs with natural lighting showed the most promising results. A sensitivity analysis showed that transport, lighting type, and crop heat gains did not change the trends in results, while the energy source greatly affected the results/outcome. To

promote more environmentally sustainable solutions, effort should be investing in reducing the total energy consumption by using natural lighting whenever possible, followed by using more renewable energy sources such as hydroelectricity instead of natural gas.

Highlight

- Comparison using life cycle assessment of tomato in Quebec (Canada)
- Estimated energy consumption using building performance simulation
- Estimated energy consumption included the crop heat gains
- Options with natural lighting were promising solutions for the Quebec context
- Support for urban agriculture decisions for planners and policy makers in Quebec

Abbreviations

ASHP: Air-Source Heat Pump (type of Heating, Ventilation, and Air-Conditioning system)

BELO: Building with Electric Lighting Only

BENL: Building with Electrical and Natural Lighting

BIAs: Building-Integrated Agriculture space

BPS: Building Performance Simulation (replication of aspects of building performance using a computer-based, mathematical model created on the basis of fundamental physical principles and sound engineering practice)

COP: Coefficient Of Performance

CWEC: Canadian Weather for Energy Calculation

DX dehumidifier: Direct expansion dehumidifier (type of Heating, Ventilation, and Air-Conditioning system)

GSHP: Ground-Source Heat Pump (type of Heating, Ventilation, and Air-Conditioning system)

GH: GreenhouseGWP: Global Warming Potential

HDD: Heating Degree Day (a measurement designed to quantify the demand for energy needed to heat a building derived from measurements of outside air temperature)

HPS: High-Pressure Sodium (type of light)
 HVAC: Heating, Ventilation, and Air Conditioning
 IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
 LCA: Life Cycle Assessment
 LCAI: Life Cycle Assessment Inventory
 LED: Light-Emitting Diode (type of light)
 NECB: National Energy Code of Canada for Building
 RH: Relative Humidity
 RoW: Rest of the World
 RTGH: Rooftop Greenhouse
 TMY: Typical Meteorological Year
 UA: Urban Agriculture

4.1 Introduction

There is rising interest in developing solutions to produce food in cities as a means of addressing increased local food demand. In cities, the population is denser and the flow of resources is highly linear, meaning that food is imported and waste produced is exported. Various solutions are needed to improve the sustainability of food consumption in cities, with “urban agriculture” being among the more prominent (Goldstein et al., 2016c).

Proposed urban agriculture solutions include protected agriculture, which consists in enabling environmental conditions that improve plant growth, and offers many advantages, including high crop productivity and the ability to produce all year round at every location, even in a harsh climate such as what prevails in northern cities (McCartney and Lefsrud, 2018). These advantages are often mitigated by high energy use and its associated costs. In the context of climate change, decisions made regarding food production and consumption methods must ensure a reduction of their ecological impact.

Life cycle assessment (LCA) is widely used to assess potential environmental impacts associated with the life cycle of any product or process, from raw material extraction to end of life, including production, distribution and use phases (ISO, 2006a, 2006b). LCA has already been used extensively to compare the environmental impacts of different agricultural products (Roy et al., 2009). One of the most studied products in this context is the tomato, and studies show significant variations in environmental impact depending on the location and the technologies used. For example, Dias et al. (2017) agglomerated, from different studies, the life cycle global warming score of greenhouse tomato production based on the average annual temperature and the heating technology used (Figure 4.1).

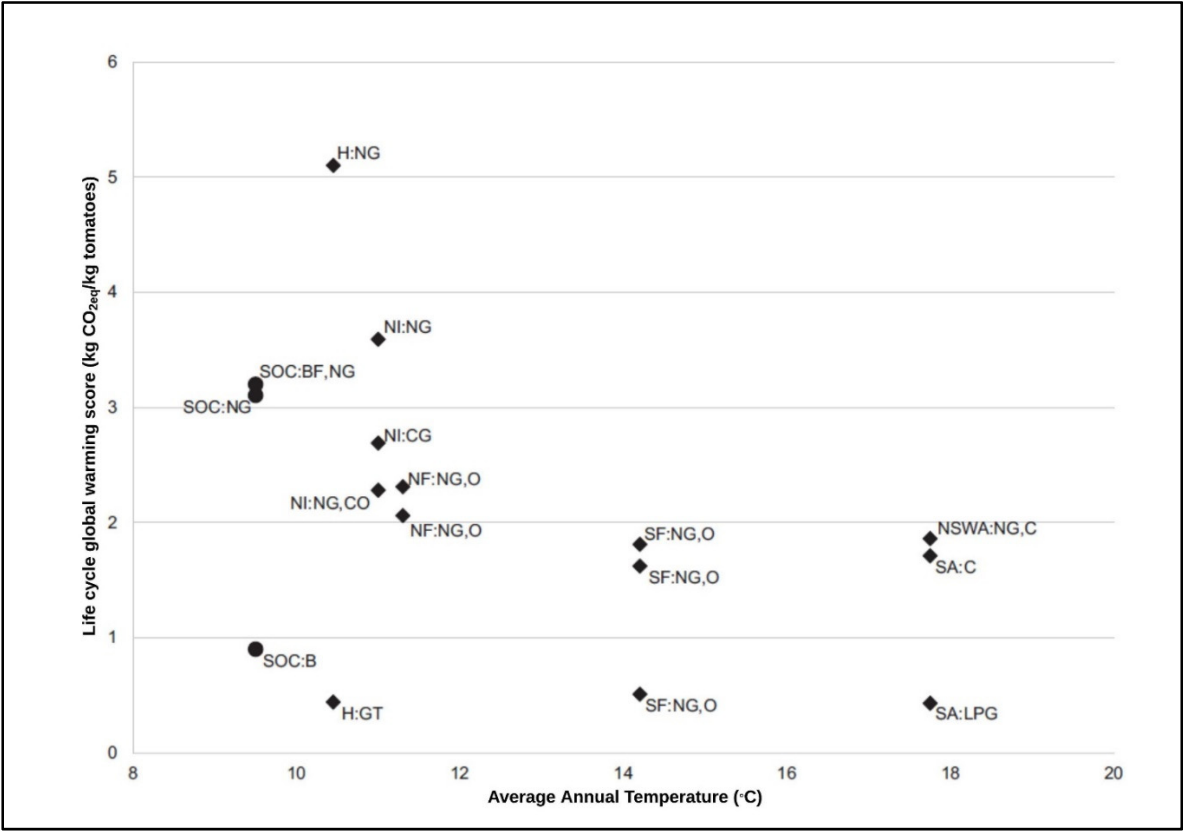


Figure 4.1: Relationship between life cycle global warming score and average annual temperature for various studies, adapted from (Dias et al., 2017)

Labels indicate the location or region, as well as the type of fuel used: SOC = Southern Ontario, Canada; NI = Northern Italy; NF = Northern France; SF = Southern France; H = Hungary;

NSWA = New South Wales, Australia; SA = Sydney, Australia; NG = Natural gas; BF = Bunker fuel; GT = Geothermal heat; CO = Canola oil; CG = Cogeneration; O = Oil; LPG = Liquid propane gas; B = Biomass. All studies are cradle-to-gate, including waste and packaging, except for Hungary.

The conclusions of this study supported the idea that heating requirements were not the only factor influencing global warming impacts. For instance, changing the fuel type from natural gas to biomass in Southern Ontario, Canada, led to a decrease from 3.2 to 0.9 kg CO_{2eq} kg tomato⁻¹ (Dias et al., 2017).

Other studies have suggested that there could be major differences in the impact score for different kinds of production or different building types for the same location. Sanyé-Mengual et al. (2015) compared urban rooftop farming, defined as the development of open-air and protected agriculture on top of buildings, in the Mediterranean, for different products. The global warming impact per kg for the rooftop greenhouse was around 0.5 kg CO_{2eq} for lettuce and 0.2 kg CO_{2eq} for tomatoes. Goldstein et al. (2016b) evaluated, using environmental life cycle assessment, the production of tomato and lettuce in different controlled and non-controlled spaces in a northern urban context, where the energy consumption was estimated using heating degree days (HDD), and neglected the energy consumption for cooling and dehumidification. Their results showed that a building integrated agriculture space (BIAs) could need as much as ten times more energy per surface area of production than a controlled environment greenhouse on the ground. Their sensitivity analysis of energy sources also showed that a change from natural gas to hydroelectricity could reduce the potential global warming score by a factor of 10, causing a smaller impact in this category of damage for the BIAs than for the controlled greenhouse on ground.

The rise of BIAs as a solution for food production is relatively recent, and as a result, only limited data is available regarding their energy consumption, which is generally coarsely approximated. For example, Eaves and Eaves (2018) used HDD to estimate the sensible

cooling energy requirements for the Quebec climate, while neglecting latent cooling (dehumidification). Building professionals are increasingly using Building Performance Simulation (BPS) tools to predict energy consumption and building conditions, from design to operation or even for retrofits of buildings. To design more reliable systems and to better understand the operating conditions of protected agriculture spaces, crop thermal activity models have been integrated into BPS tools. Ward et al. (2015) developed a TRNSYS type that simulated the growth of a tomato plant and its thermal exchanges with the surroundings. Kokogiannakis and Cooper (2015) took a similar approach by developing a general plant model for its integration into the ESP-r simulation tool. Talbot and Monfet (2018), on the other hand, used the type developed by Ward et al. (2015) to estimate the impacts of plant heat gains on loads in a BIAs. They noticed that neglecting plants could lead to significantly undersized systems. A more detailed analysis of the energy consumption of greenhouses and plant factories was completed by simulating the greenhouse and plant factory environments (Harbick and Albright, 2016). The results showed that in cold climate, about 80% of the energy consumption was for heating the greenhouse, while 17% and 43% was for cooling and lighting in a plant factory with heating requirements due to heat loss through the envelope. Graamans et al. (2018) coarsely estimated the energy use of plant factories and greenhouses for different regions using a BPS tool to evaluate resource use efficiency. Their results showed the influence of the exterior climate on the production requirements and the performance of greenhouses and plant factories.

Nadal et al. (2017) were among the first to calibrate a greenhouse using a BPS tool while integrating crop heat gains. The calibrated model was for a passive greenhouse integrated into a building in Spain. An empirical crop model, only valid for Mediterranean greenhouses with natural ventilation, was included. No energy consumption was estimated for the dehumidification of the greenhouse. Benis et al. (2017) also used BPS to model greenhouses and BIAs. They estimated energy consumption for the cooling of BIAs, but neglected the crop heat gains.

Since energy needs (e.g., heating, cooling, lights) are often among the most impacting processes in greenhouse production (Torrellas et al., 2012), BPS tools could be useful, in combination with LCA, in designing and implementing urban agriculture solutions while optimizing energy consumption and decreasing potential environmental impacts. The energetic context of the province of Quebec in Canada is quite unique: the average annual temperature is low, around 7°C for a city like Montreal (Government of Canada, 2018a) and over 99% of the electricity comes from renewable sources (94.5% comes from hydroelectricity) (Hydro-Québec, 2017). This particular context, and the fact that to our knowledge, there is no published study on the LCA of tomato production in the province of Quebec, makes it difficult to apply conclusions drawn from other studies.

This study aims to compare the environmental impacts of producing tomatoes in different protected agriculture spaces in the city of Montreal, Canada (Quebec) using LCA and BPS. Four scenarios are considered: (1) a typical plastic greenhouse built on the ground; (2) a rooftop greenhouse; (3) a building-integrated agriculture space (BIAs) with natural and electric lighting; and (4) a building-integrated agriculture space (BIAs) with electric lighting only. For the first two scenarios, in the greenhouses, the energy source for heating is natural gas, while electricity-driven equipment is used to maintain the indoor conditions in the BIAs. This study could be useful for entrepreneurs, building owners/operators or even city counselors, as it could help them prioritise and design more environmentally sustainable urban agriculture projects. The general approach used in this paper is based on the one proposed by Benis et al. (2017), in which a BPS tool is used to estimate the energy consumption of various BIAs scenarios. It extends the previously completed analysis by integrating LCA into the analysis. It is also the first assessment that compares the use of different protected agriculture spaces for the production of tomatoes in the particular energetic context of the province of Quebec.

4.2 Materials and methods

The proposed approach is adapted from Benis et al. (2017) and supplemented by an environmental life cycle assessment (LCA). This is illustrated in Figure 4.2 by Steps 1 to 3, for the simulation of greenhouses and BIAs in an urban context (adapted from Benis et al., 2017), and by Steps 4 to 7, for the LCA.

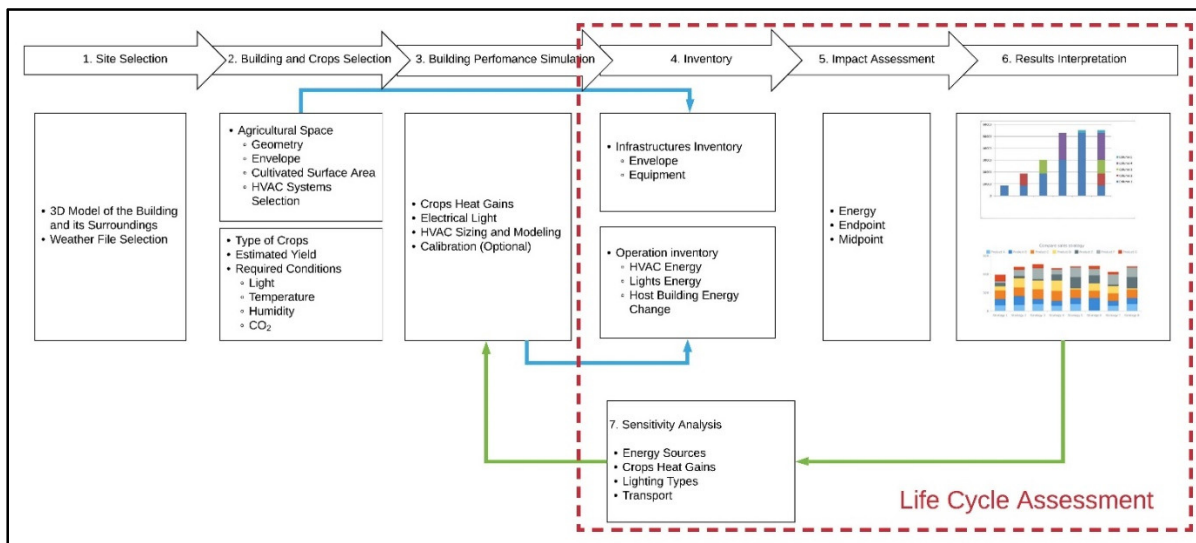


Figure 4.2: Diagram of the methodology

Data collected and assumptions made regarding the different infrastructures (Step 2) were used to feed the building performance simulation (Step 3) and the life cycle inventory (Step 4). Other inputs for the life cycle inventory were the outputs from the BPS, i.e., the estimated energy consumptions of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) and lighting systems. The life cycle impact assessment phase (Step 5) was then performed to provide impact scores. The LCA result interpretation (Step 6) included a sensitivity analysis (Step 7) to test the robustness of the results to the most contributing parameters.

4.2.1 Site selection

The four scenarios studied were hypothetical, and so their exact location in Montreal was not specified; of note though is that this had no influence on the methodology or the results obtained. The building energy consumption was predicted using a BPS tool, which required the specification of weather data. In most cases in Canada, the weather file used for the simulation is a Canadian Weather for Energy Calculations (CWEC) file, which is an hourly weather dataset created by combining twelve Typical Meteorological Months selected from a database of historical weather data files from 1953 to 1993 (Government of Canada, 2018b). The weather dataset used to complete the simulation can also be based on real monitored weather data to calibrate a model.

In this study, the CWEC for Montreal (CAN_PQ_Montreal.Intl.AP.716270_CWEC) was used for all the scenarios. The Montreal climate is humid continental and characterised by hot and humid summers and cold winters, with 4200 yearly heating degree days (Canadian Commission on Building and Fire Codes, 2015).

4.2.2 Building and crop selection

In this section, the general assumptions and descriptions of the buildings and of the crops are presented.

4.2.2.1 Building specifications

Four scenarios were compared in this study: (1) a typical plastic greenhouse built on the ground (GH); (2) a rooftop greenhouse (RTGH); (3) a BIAs with natural and electric lighting (BNEL); (4) a BIAs with electric lighting only (BELO). Figure 4.3 illustrates each of these scenarios. The type of greenhouses under study represented small-scale production such as community-based agriculture. Comparisons with large-scale production, such as a rooftop greenhouse that would occupy the entire roof of an industrial complex building was outside the scope of this

study. Extrapolating the results from this study to large-scale production needs to be done with caution since greenhouse and building structures or envelopes might be quite different.

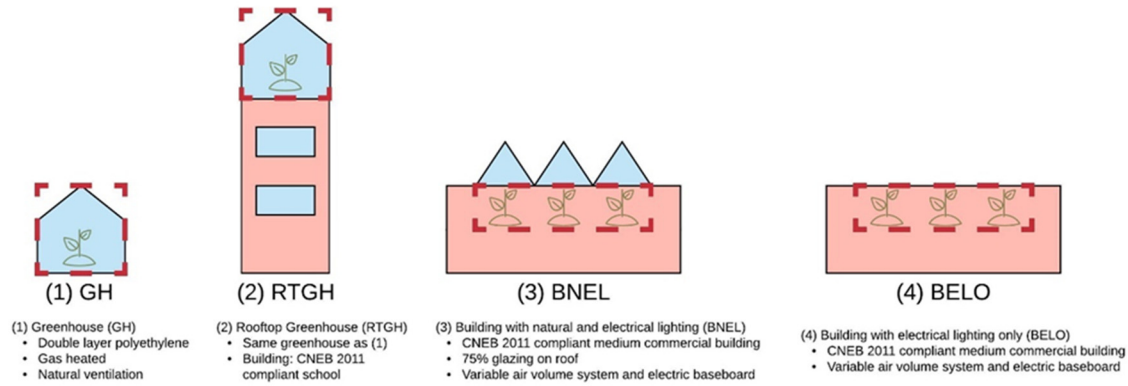


Figure 4.3: Illustration of the four case studies

The first case involved a standard greenhouse built in Montreal in 2018. Its dimensions were 7.62 m by 15.24 m, with a height of 3.66 m. Its steel structure was fixed in a concrete footing. Its envelope was a double-layer polyethylene with blown air. It had an East-West orientation with North and South openings and operable windows on the south roof for natural ventilation. For this case, the BPS model was calibrated and used to compare different energy saving measures (Léveillé-Guillemette and Monfet, 2018).

The second case involved the same greenhouse as in the first case, but located on the roof of a school built in compliance with the 2011 National Energy Code of Canada for Buildings (Canadian Commission on Building and Fire Codes, 2011). For this case, the impact of adding a greenhouse on the building to the heating or cooling energy consumption of the school was taken into account for the life cycle inventory.

The third case was composed of an agricultural space located at the top floor of an existing three-story commercial building compliant with NECB 2011. This building was modified to include a skylight that covered 75% of the roof space for natural lighting (with a thermal conductivity of $0.22 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, a visible transmittance of 0.898 and a solar transmittance of

0.837). The greenhouse structure was still considered in the life cycle inventory since the agricultural space inside of a building must be well separated from other spaces to prevent contamination or air leakage and humidity issues. To address these problems, some growers will literally build a greenhouse inside the building. Others will build an airtight construction finished with mold-resistant material (e.g., plastic).

The fourth case involved the same building as in the third case, but without skylights, and only electric lighting was used.

All the NECB 2011-compliant buildings were generated with the NECB Archetypes generator (NRCAN, 2018). In all four scenarios, CO₂ levels were estimated constant at 400 ppm. This can be achieved with the use of a CO₂ supplement system. For the first two scenarios, with the greenhouses, the energy source for heating was natural gas, while electricity-driven equipment was used to maintain the indoor conditions in the BIAs. An electric dehumidifier was included for all scenarios.

4.2.2.2 Crop specifications

The objective of the study was to compare different ways of producing crops (tomatoes) in different urban protected agriculture spaces, whether or not they were integrated into a building. The tomato production process for the LCA was based on an existing process for greenhouse tomato production available in the ecoinvent database: *tomato production, fresh grade, in heated greenhouse* | *tomato, fresh grade* | *Cutoff, U NL*. This process is used for the production of 1 kg of tomatoes produced in heated greenhouse in the Netherlands for the export market. The average yield from this process is around 48 kg m⁻² yr⁻¹. The process includes all activities from cradle to farm gate: machine operation, structure, irrigation, fuel, and electricity use. Storage and distribution are not included. The growing media modelled is stonewool. Non-organic fertilisers are applied. Heavy metal uptake by the crops is considered.

This process was modified to include the energy consumption estimated using BPS for each studied scenario to obtain a similar yield. The indoor environmental conditions maintained were as follows: indoor air temperature between 24 and 28°C in cooling and 16 and 20°C in heating, with relative humidity of 80% in both cases. The energy added or modified in the process was either natural gas for heating or electricity for lighting, fans, cooling, and dehumidification. Also, for scenarios where the agricultural space was integrated into a building, the influence on the energy consumption of the building (i.e., higher cooling or lower heating) was taken into account. Providers for the different life cycle processes were modified using the most relevant information given the geographical context (i.e., Rest of the World (RoW) for the greenhouse structure or Quebec's electricity production market). Detailed modifications are presented in ANNEXE II.

4.2.3 Simulation of the energy consumption

The scenarios studied were modelled with OpenStudio V 2.5 (Guglielmetti, Macumber, and Long, 2011), a graphical user interface that runs EnergyPlus (Crawley et al., 2001), a BPS tool. The energy consumption was estimated for the HVAC systems and electric lighting systems only. It did not account for the energy consumption of the cultivation process itself (i.e., consumption by pumps for irrigation).

4.2.3.1 Building envelope and HVAC systems

The envelope and HVAC system inputs for the greenhouses are summarised in ANNEXE III. The school (for RTGH) and the medium office building (for BENL and BELO) were modelled using the NECB Archetypes Generator (NRCAN, 2018).

4.2.3.2 Lighting systems

Electric lights and environmental controls were modelled to obtain yields similar to the initial ecoinvent process ($48 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$). It was considered that 50% of the agricultural space ground

surface was occupied by tomato plants and that the remaining ground surface reflected 80% of the global shortwave radiation received back onto the plants (Heuvelink and Dorais, 2005). Crop yield was estimated with a rule of thumb of 1 kg of tomato for 50 MJ of global shortwave radiation received by the plants (Dorais, 2003). The crop yield for greenhouses was estimated at $43 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ under natural lighting only. Since this value was close to the crop yield of the initialecoinvent process, additional electric lighting was not considered for these scenarios. Crop yields for scenarios in buildings were targeted at $50 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$. The difference between the daily natural shortwave radiation received by the plants and the targeted values for a 16-hour photoperiod was supplemented to the plants using modulating High-Pressure Sodium lamps (HPS).

Sizing of the lamps was completed based on the hourly requirements, considering a lamp efficiency of 30% (Dorais, 2003). For the building with natural light, the maximum requirement was estimated at 428 W m^{-2} . The sizing was made with a value of 400 W m^{-2} since it would be sufficient 99% of the time, and it is a common lighting density used in production in Quebec (Dorais, 2003). For the building without natural light, 440 W m^{-2} was needed for each hour of the 16-hour photoperiod.

4.2.3.3 Crops heat gains

HVAC equipment controlling the environment of agricultural spaces is often sized while neglecting the thermal impacts crops have on their environment (ASHRAE, 2015). Graamans et al. (2017) and Talbot and Monfet (2018) investigated the impact of plants as heat gain. They suggested that the lighting energy captured by the crops induced a non-negligible portion of air space sensible or latent heating gains through processes of respiration and evapotranspiration.

Other studies have looked at simulating crop gains using BPS tools (Kokogiannakis and Cooper, 2015; Talbot and Monfet, 2018; Ward et al., 2015). The crop model developed by

Ward et al. (2015) is partially integrated into the TRNSYS simulation software (Beckman et al., 1994), but is resource-intensive. To shorten simulation runtimes and integrate the plant heat gains into the EnergyPlus software, the model was run for different static indoor conditions, and hourly gains were estimated to the closest values. For indoor temperatures oscillating between 16 and 30°C and a relative humidity (RH) of 70 to 80%, the sensible heat gain (loss) for the crop varied between -355 and -40 W·m⁻², and between 110 and 425 for the latent heat gain. The complete set of values tabulated and used in this study is presented in ANNEXE IV.

For the greenhouses, the crop heat gains were slightly overestimated since there was no supplemental lighting, and radiation values were sometimes lower than 80 W m⁻².

4.2.4 Life cycle inventory

In this study, the functional unit was the production of 1 kg of tomato at the farm gate. This meant that the storage and transport of tomatoes to the consumer, as well as the use phase, were not included in this analysis, as they were the same for every scenario. For scenarios where the agricultural space was inside or attached to an existing building, the construction of the building itself was not considered. Indeed, the building was there in all scenarios. For scenarios with electric lighting, only the energy consumption was considered. Light bulbs and structures were not considered. All other processes, from material extraction to operation, were considered. Figure 4.4 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** summarises the life cycle stages and processes included and excluded from this study.

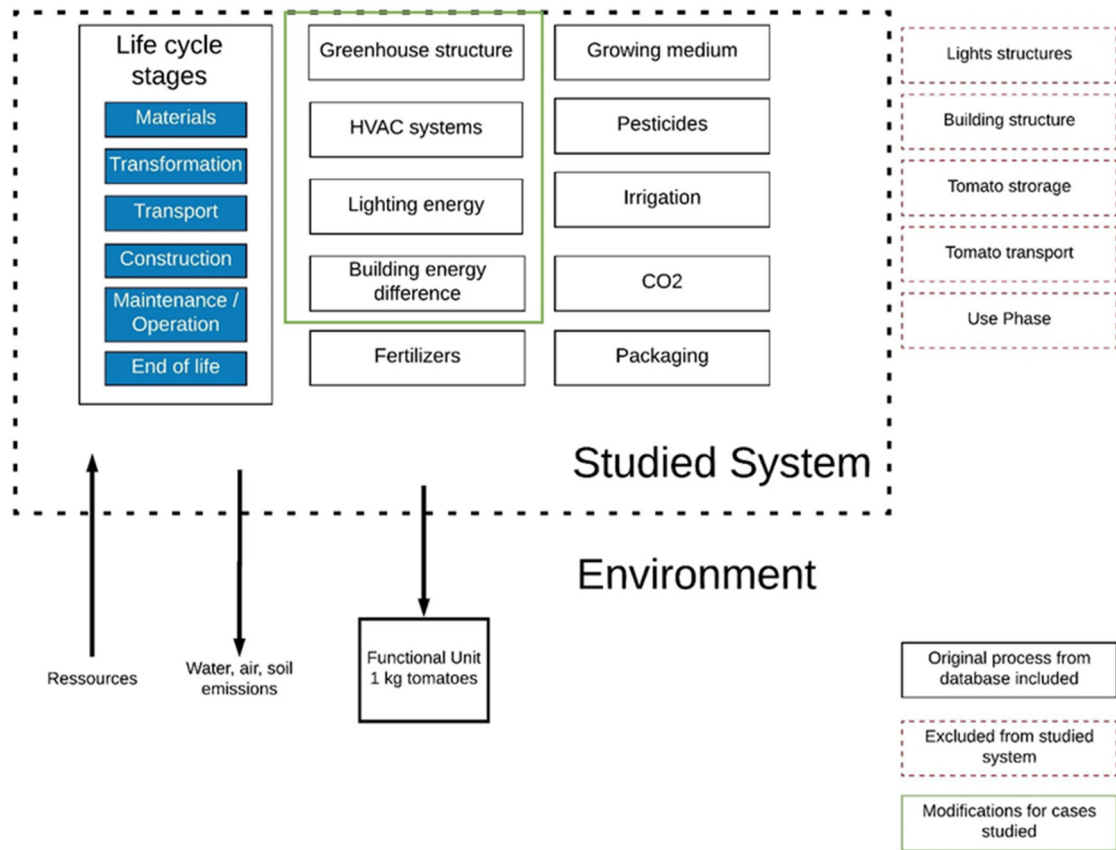


Figure 4.4: System boundaries for the life cycle inventory

Detailed inputs for the BPS and the life cycle assessment inventory (LCAI) are presented in ANNEXE V.

4.2.5 Life cycle impact assessment

This study used the IMPACT 2002+ midpoint-endpoint impact assessment method included in the ecoinvent database V.3.4 (Joliet et al., 2003). In LCA, emissions of pollutants occurring over the entire life cycle are inventoried and categorized according to the type of environmental impacts they might produce. For a given impact category, each emission is multiplied by a characterization factor, i.e., an indicator quantifying the potential impact of the pollutant per unit mass emitted. Results are then summed up into an impact score. As an example, for global

warming, the indicator used is the Global Warming Potential (GWP) in kgCO₂eq/kg, as published by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Myhre et al. 2013). This indicator compares the impact of a given greenhouse gas on cumulative radiative forcing (W m⁻²) to that of CO₂. Each greenhouse gas emission is multiplied by its GWP value, and results are summed up to get the global warming score in kgCO₂eq.

Midpoint impact categories are often used in studies on tomato production to compare systems on a broad range of environmental impacts. Endpoint results rely on modeling the entire cause-effect chains and represent the potential damage to areas of protection, such as human health, ecosystems, and resources. In other words, midpoint categories that contribute to potential impacts on human health, for instance, are modelled further and aggregated into one single endpoint category.

4.2.6 Sensitivity analysis

Many assumptions were made while collecting data for the different scenarios. To reinforce the robustness of the results and conclusions raised, a sensitivity analysis was performed on the following inputs: lighting types, heating energy sources, crop heat gains and transport.

4.3 Results

BPS results are presented first. LCA endpoint and midpoint impact scores are then shown for each scenario. Sensitivity analysis results are also presented to help reinforce the robustness of the conclusions.

4.3.1 Energy portfolio

Figure 4.5 presents the energy consumption per square meter per year for HVAC and lighting systems of every scenarios under study.

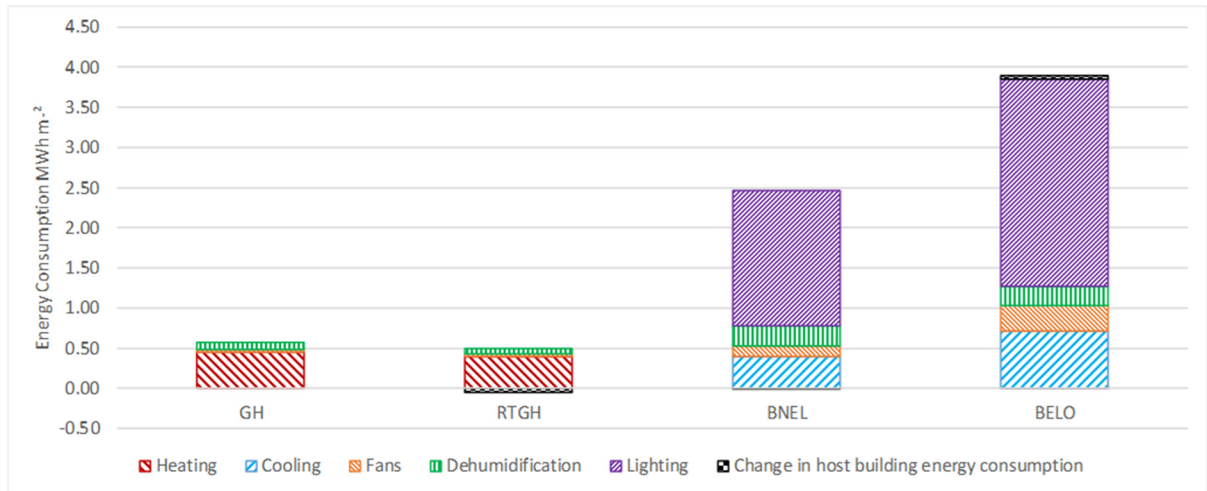


Figure 4.5: Estimated energy consumption distribution

For the greenhouse scenarios, heating and dehumidification had the highest impacts on energy consumption. In the standard greenhouse, heating and dehumidification accounted for 78% and 15% of the total energy consumption. For the rooftop greenhouse, heating accounted for 80% of the energy consumption and dehumidification accounted for 12%. These proportions were in the same range as those obtained by de Halleux and Gauthier (1998) on dehumidification needs in greenhouses and supported the validity of the dataset used to estimate the crop heat gains.

For the scenarios inside buildings, the largest contributors to energy consumption were lighting and cooling, followed by dehumidification and fans. For the building with natural light (BNEL), these energy consumptions represented 68%, 16%, 10% and 5% of the total energy consumption. For the building without natural light (BELO), these same processes represented 67%, 19%, 6% and 8% of the total energy consumption.

The energy per square meter required to cultivate inside buildings was four to eight times higher than in greenhouses. In terms of energy needed to maintain the interior conditions (temperature and RH), it was 1.4 to 2.5 times higher for the BIAs than for the greenhouses.

4.3.2 LCA results

Endpoint and midpoint impact scores, as well as the contribution of processes for every scenario, are presented and compared here.

4.3.2.1 Comparative analysis

Figure 4.6 presents the relative endpoint impact score for each case. The results obtained were normalised relative to the highest impacting case. As an example, the total potential impact on ecosystem quality for the greenhouse (GH) represents 10% of the total potential impacts of the building with electric lighting only (BELO), as shown in Figure 4.6.

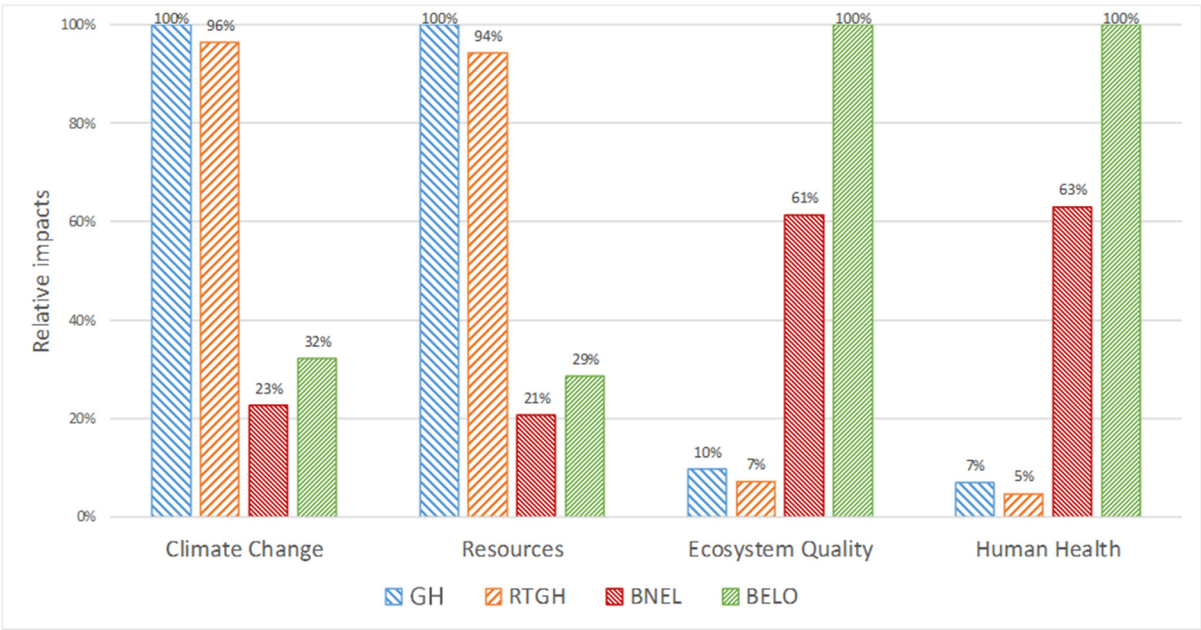


Figure 4.6: Endpoint results normalised with the highest impact case

There was no single best case for all impact categories. Greenhouses (GH & RTGH) were by far less impacting for ecosystem quality and human health, but were the most impacting for resources and climate change. Global warming scores for the greenhouse (GH), the rooftop greenhouse (RTGH), the building with electrical and natural light (BNEL) and the building

with natural light only (BELO) were 2.79, 2.67, 0.62 and 0.89 kg CO_{2eq} kg tomato⁻¹. The global warming score of every case was within the range of the previous tomato LCAs performed around the globe (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). The greenhouse score was relatively close to the one estimated for tomato production in southern Ontario (Dias et al., 2017). Those results were anticipated since the two regions have a similar climate.

4.3.2.2 Contribution analysis

Figure 4.7 presents the contribution of the most impacting processes for each endpoint impact category for every case. Results are normalised relative to the total impact of each case.

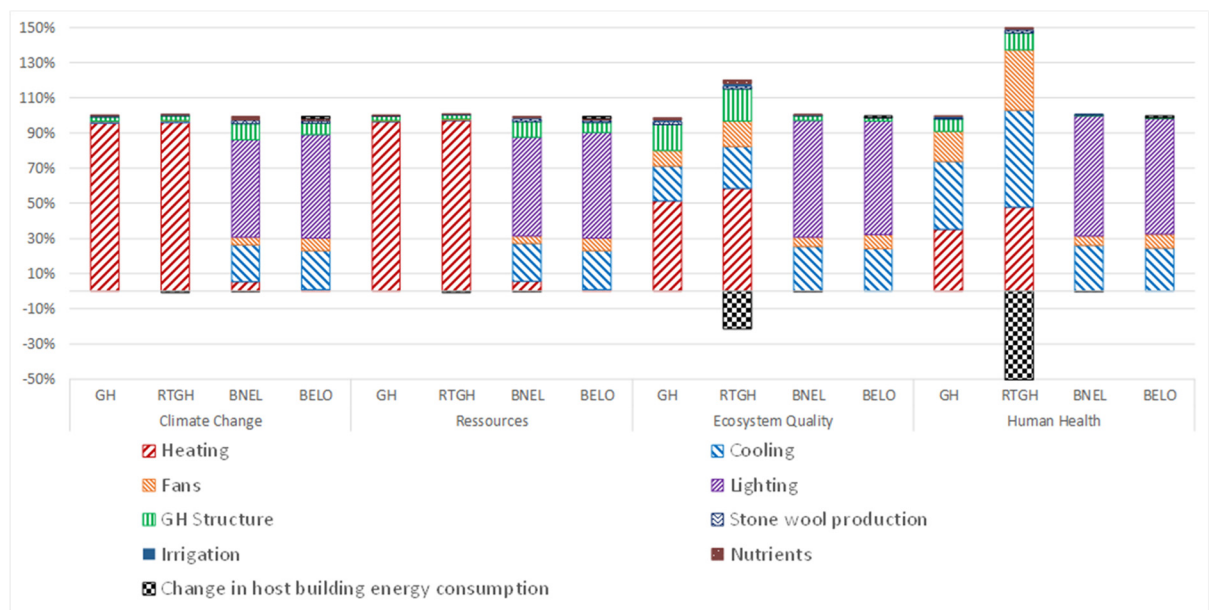


Figure 4.7: Contribution analysis for endpoint impact categories

For all scenarios, the contribution to the total endpoint energy consumption impact score for production (lighting and HVAC systems) varied between 82% and 99%. With such high energy consumption, even with renewable electricity, other production processes (irrigation, pesticides, seedling, packaging, etc.) were negligible. High impacts on climate change and resources in the greenhouse scenarios were solely explained by the heating consumption from

natural gas. As for the impacts on human health and ecosystem for agricultural spaces in buildings, the most contributing processes were lighting, cooling, and fans, which were all electric consumptions. Negative contributions were credited energy consumptions for the reduction in the host building energy consumption caused by the integration of the agricultural space (in this case, mainly for the rooftop greenhouse).

4.3.2.3 Contribution of midpoint categories to endpoint results

Figure 4.8 presents the midpoint contribution to total endpoint results, normalised relative to the highest impacting case.

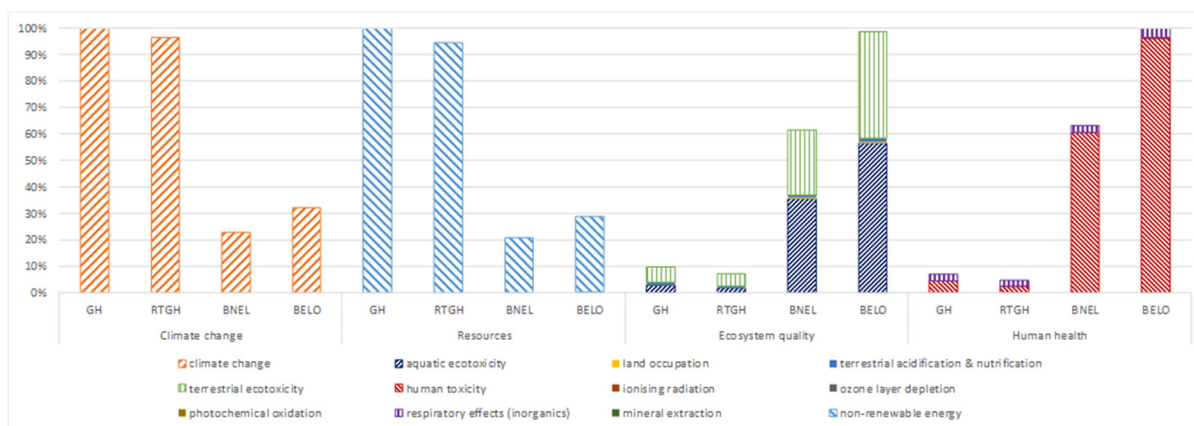


Figure 4.8: Midpoint contribution to endpoint impacts

High impacts on aquatic, terrestrial and human toxicity are due to hydroelectricity consumption, while high impacts on climate change and resources are due to natural gas consumption.

4.3.3 Sensitivity results

The scenarios compared in this study were hypothetical. Even with a rigorous literature review and credible data inputs, the results relied on assumptions that might only be somewhat

reliable. A sensitivity analysis was performed on key factors or processes that had a relatively high contribution to the results, i.e., heating sources for the greenhouse scenarios, different lighting types for the scenarios inside buildings, and crop heat gains for all the scenarios. For the different heating sources, the following efficiencies were considered: 93% on gas heating (GH), 100% on electric heating, coefficient of performance (COP) of 3.9 for geothermal heat pump (GTHP) heating, and COP of 3.3 for air-source heat pump (ASHP) heating. For the analysis of the lighting type, HPS and light-emitting diode (LED) were compared. The efficiency of the LED lighting was considered at 52% (Royal Philipps, 2018). Figure 4.9 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** presents the normalised endpoint impact results for different heating sources and lighting types.

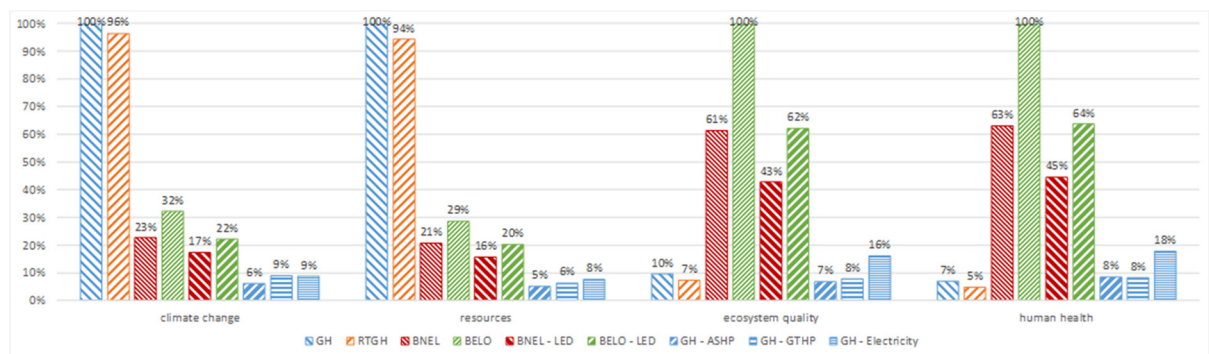


Figure 4.9: Sensitivity analysis on building light types and greenhouse heating sources; Geothermal heat pump (GTHP), Air-source heat pump (ASHP)

A switch of the heating energy source from natural gas to electricity, and in the case of Quebec to hydroelectricity, did not translate to lower impacts for all categories. Impacts on resources and climate change dropped considerably, but at the cost of higher impacts on ecosystem quality and human health. While the gap in relative difference was higher for resources and climate change than for ecosystem quality and human health, this did not clearly distinguish which solution would be better.

The air-source heat pump scenario did not consider the inventory for the system and its installation, but the ground-source heat pump did, and their relative impacts were relatively

close. This was because impacts associated with the equipment itself was minimal as compared to impacts of the energy consumption over the total life cycle. Moreover, ground-source heat pumps have higher COP, but more resources are required for the excavation. Ultimately, the environmental impacts of both technologies were similar for this application. They were the solutions with the lesser impacts in all categories. Their impacts on resources and climate change would also be lower than the lowest of the base scenario (BENL). This change in technologies would modify the global trends in the results.

Changing the lighting type did have significant impacts on the endpoint categories, but it did not change the global outcome of the results: scenarios using electric lighting had higher impacts on ecosystem quality and human health, but lower impacts on resources and climate change.

Figure 4.10 presents the normalised endpoint impact scores for all the scenarios, neglecting the impact of the crop heat gains (NC).

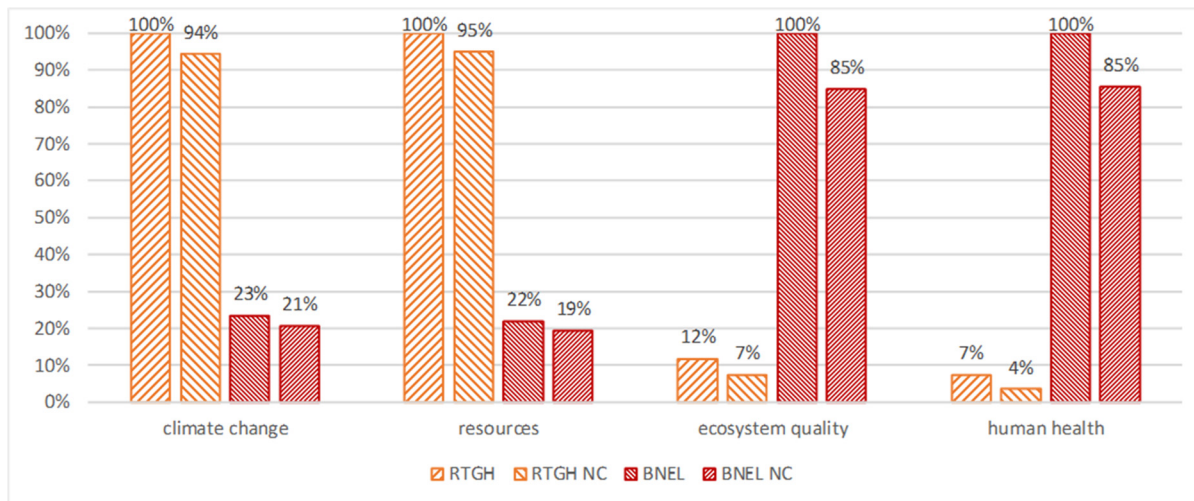


Figure 4.10: Sensitivity analysis on neglecting crops heat gains (NC)

Neglecting crop heat gains led to the same rankings as in the initial endpoint comparative analysis. Also, the differences in the relative impacts were less than 6%: the crop heat gains affected all scenarios equally.

The energy needed to maintain the indoor environmental conditions (cooling and dehumidifying) when crop heat gains were considered accounted for up to 98% of the impacts in certain categories. This was the case for the human health category for greenhouse scenarios, where most of the contribution to the electricity consumption was due to the use of a dehumidifier. This highlights the importance of considering the crop heat gains when estimating energy consumption.

The last sensitivity analysis covered transport. Each case study ignored the transport of tomatoes since all production types could be implemented at the same location in a city like Montreal. Since greenhouses are mostly erected outside cities, it can be interesting to look at changes in the results trends for different transportation distances: 50 km, 100 km, and 900 km. 50 km represented the Greater Montreal metropolitan area, 100 km represented the distance between Montreal and most of its adjacent rural regions, and 900 km represented the distance between Montreal and Leamington, the city in the province of Ontario with the highest greenhouse concentration in all of North America (Hendricks, 2012). The ecoinvent process considered for this transport was *market for transport, freight, lorry with refrigeration machine, cooling*. Figure 4.11 presents the normalised endpoint impact scores for the greenhouse scenarios with different transport distances.

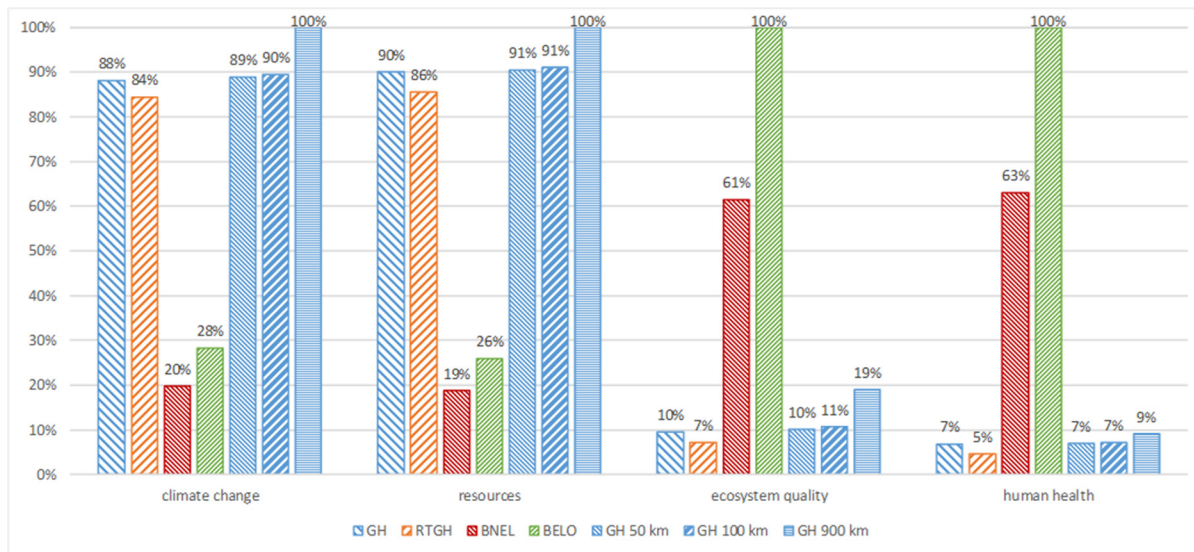


Figure 4.11: Sensitivity analysis of transport distance

Transport did not change the general trends of the results: greenhouses heating with natural gas still had lower ecosystem quality and human health impacts and higher resources and climate change impacts. For longer distances, we may need to consider different types of transport, such as by boat or by plane. The general inventory would be completely different since longer distances certainly mean different climate and energy consumption for production.

4.3.4 Discussion

This study is one of the first to estimate the energy consumption of BIAs in colder climate using a BPS tool while integrating crop heat gains. These gains are estimated using a general model that can be used for several types of buildings and conditions with a BPS tool (Ward et al., 2015). Results show that 80% of the energy consumption goes to heating in greenhouses, while 15% and 70% go to cooling and lighting in BIAs (Figure 4.5). Similar results were obtained by Harbick and Albright (2016) for greenhouse heating and BIAs cooling and by Eaves and Eaves (2018) their simulations based on HDD for a greenhouse and a vertical farm located in Quebec.

The energy consumption estimated for the greenhouse (GH) of $0.58 \text{ MWh} \cdot \text{m}^{-2}$ is similar to the one obtained by Graamans et al. (2018) of around $0.5 \text{ MWh} \cdot \text{m}^{-2}$ for a greenhouse producing lettuce located in Sweden, whose climate is similar to Quebec's. For the BELO scenario, which is similar to a plant factory, the estimated energy consumption is about twice as high (Graamans et al., 2018). This is explained by the energy consumption of the lighting systems, which is around $1.12 \text{ MWh} \cdot \text{m}^{-2}$ compared to $2.57 \text{ MWh} \cdot \text{m}^{-2}$ for the BELO scenario. The difference in lighting energy consumption is explained by the lower lamp efficiency considered for the BELO scenario (30% vs. 50%). For the energy consumption of the dehumidification system of the greenhouses, they are in the same range as those obtained by de Halleux and Gauthier (1998). For the BELO, the estimated energy consumption of $0.24 \text{ MWh} \cdot \text{m}^{-2}$ for dehumidification is similar to the one estimated by Graamans et al. (2018) of $0.22 \text{ MWh} \cdot \text{m}^{-2}$ for a plant factory in a similar climate.

The LCA analysis shows that lower energy consumption does not necessarily mean lower impacts in all categories. The rooftop greenhouse scenario has the lowest energy consumption, but since its heating source is based on fossil fuels, it has higher impacts than both building-integrated scenarios on climate change and resource depletion. The reason for the comparison with gas heating is that it is the most commonly used in the agricultural sector in Quebec (SPSQ, 2008), as well as the cheapest, most accessible and reliable source of heating for greenhouse producers. A different heating source, such as switching from gas heating to electrical heating, for the rooftop greenhouse, would potentially make this scenario a better option for the environment. The sensitivity analysis shows that switching to electric heating in the standard greenhouse scenarios reduces the global warming impact score by 90%, but also increases the ecosystem quality and human health potential impacts by 70% and 160%. The sensitivity analysis by Goldstein et al. (2016b) also point to significant reductions in the global warming impact score for hydroelectricity usage. The other metrics used in their comparison were different and did not show the same impact shifting problems. They did not consider impacts categories where, for example, hydroelectricity would lead to higher impacts on aquatic and terrestrial ecotoxicity or human toxicity.

The rooftop greenhouse is the scenario with the greatest positive energy exchange with the building. In the other scenarios, where the agricultural space is inside the building, the heating is lower, and the cooling is higher for adjacent spaces. These energy changes, when puttogether, either cancel themselves, such as in the BNEL scenario, or create an additional energy demand, such as in the BELO scenario. This increase is not significant in terms of environmental impacts. On the other hand, a decrease in building energy consumption for the rooftop greenhouse can be significant, and could even be optimised. In this case study, the greenhouse was simply laid on the roof. The energy consumption associated with heating and cooling is reduced simply because of higher external temperatures during the winter or lower solar radiation during the summer. The excess heat in the greenhouse could be used more efficiently, such as by using thermal storage for example (Bastien, 2015). Reductions in heating energy consumption for the greenhouse could also be possible by using the return air of the building or simply by having a more passive design (North wall insulation, thermal blanket, shading, etc.). The concept of using return air within the greenhouse has already been proposed by Nadal et al. (2017), but needs to be further investigated for different climates, and its impact on energy consumption examined. As for modifying the heating system, the costs are high, and the payback time is long if no incentives are available (Léveillé-Guillemette and Monfet, 2018).

The global warming scores of 2.79 and 2.67 kg CO₂ eq obtained for the greenhouse scenarios for the standard and rooftop greenhouse are slightly below the 3.2 kg CO₂ eq estimated by Diaz et al. (2017) for the production of tomatoes in a heated greenhouse in southern Ontario, Canada. The difference could be explained by the size of the Ontario greenhouses, which is larger, as compared to the one modelled in this study, as well as the higher heating requirements for dehumidification using natural ventilation.

For the rooftop greenhouse, it is not possible to make comparisons with the results obtained by Sanyé-Mengual et al. (2015) since the LCA was completed for a passive BIAs in a Mediterranean climate, with a global warming score estimated at 0.2 kg CO₂eq for tomatoes,

which is much lower than the results obtained in this study, since the yield was also 3 times lower. For the BIAs scenarios, the global warming score is in the same order of magnitude as those estimated by Goldstein et al. (2016b), and similar trends were observed by Benis et al. (2017), even though only the global warming potential associated with energy consumption was considered.

Without an arbitrary weighting between endpoint impact categories, there is no scenario that can be identified as the single best option for the environment. The two scenarios that come closest to this are the rooftop greenhouse and the building with natural and electric lighting. They are both integrated into a building and make use of natural light. These two scenarios do not consider the building structure or massive changes to it. The rooftop greenhouse and the building with natural light were also the best performing scenarios in Benis et al. (2017). Comparisons with this study should be made with caution since the climate is completely different in both cases, and the method used to estimate the crop yield (affecting lighting consumption) is also different. Benis et al. (2017) also compared different types of production (soil vs. hydroponic), while only the buildings were compared in this study.

One interesting observation from both studies is that the scenarios in which the agricultural space has no natural light have higher potential environmental impacts, even when using a renewable source of energy. The concept of cultivating in containers or other types of “black boxes” is really not the most environmentally viable solution. It might be economically viable as Eaves and Eaves (2018) concluded that the gross profit is slightly higher for vertical farms as compared to greenhouses in Quebec, and could lead to other benefits such as community empowerment, social inclusion and a community building process (Sanyé-Mengual et al., 2015).

4.3.5 Conclusion

A comparative environmental life cycle assessment was performed using data generated with a building performance simulation tool for the case of tomato production in an urban context. This is the first study to assess the potential environmental impacts of tomato production for different protected agriculture spaces in the specific energetic context of Quebec. It is also one of the first studies to assess the impacts of crop heat gains in BIAs using BPS. The results obtained could support the decision process of planners and policy makers.

In the study, the energy needed for heating, cooling and lighting had by far the greatest impact for tomato cultivation, and varied greatly depending on the building type. Gas heating was the most contributing process for resource depletion and climate change in both greenhouse scenarios, with a relative impact of 96%. Electricity consumption for cooling and lighting were the most contributing processes in the ecosystem quality and human health impact categories. The relative impact of cooling and fan consumption in the different scenarios varied between 31% and 90% for the human health category and between 29% and 38% for the ecosystem quality category. The relative impact of lighting in the BIAs scenarios was around 70% for the human health and the ecosystem quality. Lighting also represented 55% to 60% of the impacts of climate change for these scenarios.

Results did not point to a single best solution, but integration into the building with natural light, such as for the rooftop greenhouse and the building-integrated agriculture space with natural lighting, was more promising. The sensitivity analysis showed that lighting types and transport does not affect the general trends in results, but the type of energy used may greatly change the results/outcome. The rooftop greenhouse scenario could easily be the best option for the environment following minor changes to the building operation, such as changing the heating system to an electric boiler or to an air-source heat pump. It also had a positive energy exchange with the building, and opened the door to greater synergy with the building, such as the use of return air or thermal storage of excess heat.

The cultivation system and structure were taken from existing cases in the Netherlands and France. It could be interesting to perform a complete inventory out of real cases from the province of Quebec to improve the geographical representativity of the results. The energy consumption of the cultivation system, such as with irrigation pumps, could also be added to the inventory.

An economic assessment would certainly lead to different trends in results. A recent study demonstrated the possible profitability of vertical farming in the province of Quebec (Eaves and Eaves, 2018). It would be pertinent to perform such an analysis for the scenarios of this study while considering the internalisation of the environmental costs with different mechanisms (carbon tax, carbon market, etc.).

Another interesting angle to investigate would be the social impacts of these types of agriculture. Some functions, other than food security, can include the education and promotion of healthy habits or the empowerments of communities, for example. Such an analysis may be done with social science tools such as a qualitative interview study (Sanyé-Mengual et al., 2015; Schmutz et al., 2018).

4.3.6 Acknowledgements

This work was supported by the Fonds de recherche du Québec – Nature et technologie (FRQNT) [grant number 208052] and by the École de technologie supérieure (ÉTS)

CHAPITRE 5

DISCUSSION

Une première calibration de serre contrôlée a été effectuée avec des outils de SPB en suivant les recommandations du guide 14-2002 de l'ASHRAE (2002). Comme les plantes étaient cultivées en très faible densité, le modèle n'a pas eu à intégrer les gains thermiques des plantes lors de la calibration. Également, ces gains étaient majoritairement compensés par la ventilation naturelle présente même l'hiver. Les aspects ayant la plus grande incertitude et les plus grands impacts sur la calibration étaient la résistance thermique de l'enveloppe, le débit de ventilation naturelle ainsi que les pertes thermiques par le sol. Le modèle a permis l'évaluation de certaines mesures d'économie d'énergie les plus citées dans la littérature.

Les mesures avec les périodes de retour sur investissement (PRI) les plus rapides étaient celles qui modifiaient l'enveloppe et le concept architectural de la serre. L'installation d'un mur de masse ou d'isolant sur le mur Nord permettaient de faibles économies d'énergie, mais étaient parmi les mesures les moins onéreuses. L'analyse effectuée sur la quantité d'ensoleillement au sol sacrifiée par ce genre de modifications pointait vers une différence minime de 2% annuellement. Ces résultats portent à se questionner sur les types de serres actuellement construites au Québec. Pourquoi construisons-nous encore les mêmes modèles de serres qu'employés aux États-Unis ou en France? Est-ce une question de simplicité de construction à grande échelle et de réduction de coûts en capital? Les résultats obtenus dans cette étude ne sont effectivement valables que pour des serres de petite superficie. Pour des serres de plus grande superficie, ces mesures seraient probablement moins performantes et profitables. Toutefois, pour des serres de petite superficie, les résultats obtenus semblent indiquer qu'un design de serre inspiré des bâtiments solaires passifs aurait une plus grande rentabilité à moyen terme. Ces designs atypiques avaient d'ailleurs déjà été envisagés au Québec dès les années 1970 (Lawand, Alward, Saulnier, & Brunet, 1975) et plusieurs serres de ce type existent dans le Nord de la Chine orientée sur ce modèle (Tong, Christopher, Li, & Wang, 2013). La

recherche, le développement et l'intégration de ces technologies au Québec devraient être davantage encouragés.

Il est toutefois important de mentionner que la PRI calculée au CHAPITRE 3 est largement sous-estimée. En effet, le coût du gaz utilisé lors de la publication de l'article ne tenait compte que des frais associés à la consommation (fourniture) du gaz. En tenant compte des frais de transport, d'équilibrage, de distribution et d'ajustement, les coûts d'utilisation du gaz sont pratiquement doublés, ce qui réduit les PRI de mesures de conservation d'énergie. Pour l'ensemble des scénarios étudiés, une PRI deux fois plus rapide pourrait être attendue. Cette erreur n'avait pas été soulevée par les réviseurs, mais a été soulignée par un employé d'Énergir lors de la présentation de l'article en conférence.

L'installation de la serre sur le toit d'un nouveau bâtiment permettrait entre 12% et 23% d'économie en chauffage sans aucune autre synergie avec le bâtiment (entre 17% et 30% en considérant les économies de chauffage du bâtiment). Une plus grande synergie serait possible en réutilisant l'air d'évacuation du bâtiment pour alimenter la serre ou en effectuant la réutilisation d'eau de pluie ou d'eaux grises. Cela permettrait des économies en chauffage, climatisation et déshumidification selon les vocations et horaires des bâtiments. De telles analyses se feraient idéalement avec un modèle expérimental et engendreraient certainement un degré supplémentaire de complexité dans la modélisation qui sortait du cadre de cette étude.

La calibration du modèle a donné une plus grande confiance dans les consommations énergétiques générées pour l'ACV. Les gains thermiques des plants de tomates estimés avec les travaux de Ward et al. (2015) et Talbot et Monfet (2018) et les consommations énergétiques associées ont pu être comparées avec celles précédemment établies dans la littérature (de Halleux & Gauthier, 1998). Sans être une validation expérimentale, cela a permis de renforcer la confiance dans les modèles récemment ajoutés aux outils de SPB. La méthode utilisée pour intégrer les gains thermiques des plantes est un pas de plus dans la réflexion sur une méthodologie générale d'intégration de ces gains dans la conception et l'analyse d'eAIB. Il

n'est effectivement peut-être pas nécessaire de modéliser avec précision la croissance des plantes à toutes les secondes. L'analyse de sensibilité effectuée démontre l'importance de ces gains sur les consommations énergétiques, mais sur les impacts environnementaux également. L'électricité nécessaire à l'utilisation d'un déshumidificateur pour contrôler les gains des plants de tomates dans une serre chauffée au gaz représenterait effectivement jusqu'à 98% de l'impact des dommages sur la santé humaine. L'alternative de combattre ces gains par ventilation aura tôt fait d'augmenter la consommation de gaz et l'impact sur les changements climatiques. Ces résultats se verraient peut-être encore plus accentués dans des scénarios de culture plus intensive.

Le score de réchauffement climatique des scénarios étudiés dans cette première ACV de la tomate du Québec se trouve dans les mêmes limites que ceux précédemment établis dans la littérature. La Figure 5.1 met ainsi en perspective les résultats de cette étude avec les résultats trouvés lors de la revue de littérature, où la définition de Low-Tech, Med-Tech et High-Tech est telle que décrite au Tableau 1.2, BENA est bâtiment avec éclairage naturel et artificiel, et BEAU est bâtiment avec éclairage artificiel uniquement.

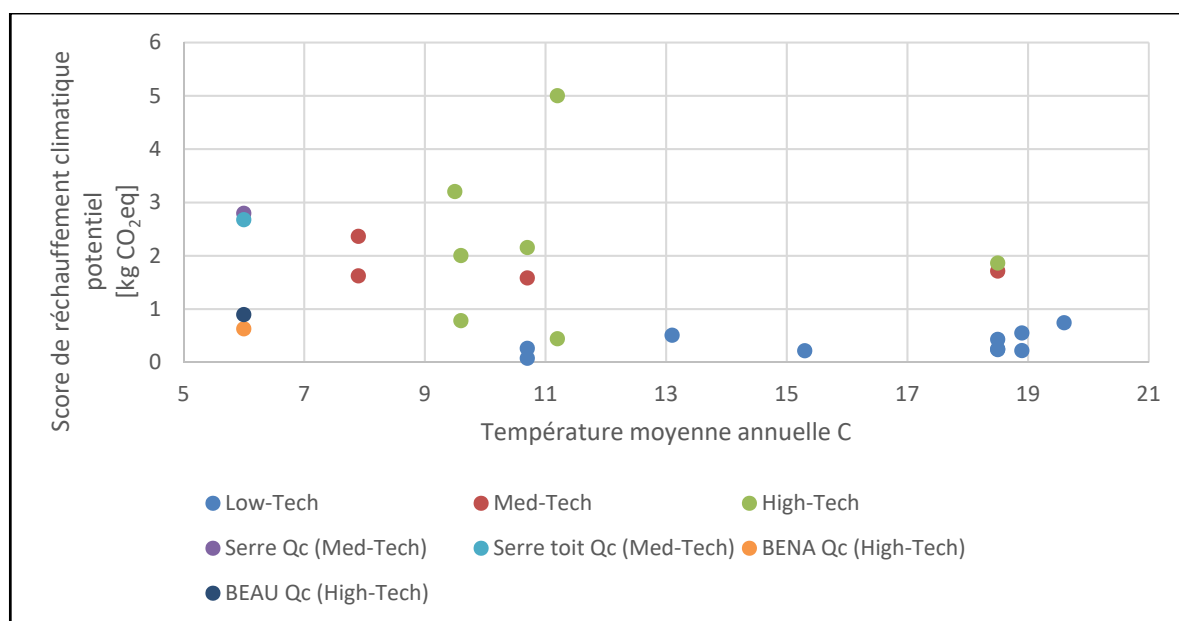


Figure 5.1: Comparaison du score de réchauffement climatique potentiel de la tomate du Québec avec d'autres régions du monde.

Pour une serre de petite superficie au Québec, l’empreinte carbone serait moindre que celles des serres du Sud de l’Ontario. Les cultures High-Tech du Québec sont avantagées vis-à-vis des Med-Tech sur l’empreinte carbone, principalement à cause de leur source énergétique. Effectivement, les espaces high-tech du Québec permettraient une empreinte comparable aux cultures low-tech des régions plus chaudes (Bojacá et al., 2014; Boulard et al., 2011; Page et al., 2012; Payen et al., 2015; Torrellas et al., 2012). Toutefois, la comparaison avec cet indicateur unique est trompeuse puisque les espaces High-Tech du Québec sont les scénarios les plus énergivores. Ils ont une faible empreinte carbone simplement à cause de la source énergétique renouvelable à 97%. L’hydroélectricité du Québec est peut-être une énergie renouvelable avec de faibles impacts sur les changements climatiques, mais sa consommation entraîne certainement des impacts dans d’autres catégories. Les impacts potentiels des serres traditionnelles sur sol sont 10 à 14 fois inférieurs à ceux des eAIB avec uniquement de l’éclairage électrique dans les catégories de qualité des écosystèmes et de santé humaine. De façon générale, les scénarios qui performant le mieux dans l’ensemble des catégories de dommages sont le scénario de la serre sur toit et le scénario d’eAIB avec éclairage naturel et électrique. Ces deux scénarios bénéficient d’une réduction de consommation énergétique grâce à l’intégration au bâtiment et à l’utilisation de l’éclairage naturelle. Bien que les climats diffèrent entre les deux études, des résultats similaires sont également obtenus par Benis et al. (2017) pour leur étude de cas au Portugal.

L’analyse de sensibilité effectuée sur l’efficacité des lampes tend à démontrer que ces tendances demeurent peu importe le type de lampes utilisées soit : des lampes à vapeur de sodium sous haute pression (SHV) (30% eff.) ou des lampes à diode électroluminescente (DEL) (50% eff.). Toutefois, si la source énergétique des serres Med-Tech du Québec est changée pour de l’électricité ou que l’utilisation de pompes à chaleur est considérée, elles performant mieux dans toutes les catégories de dommages. En effet, leur consommation énergétique totale est 1.15 à 3 fois moins importante que celles des eAIB. La principale barrière à l’utilisation de l’électricité pour le chauffage des serres au Québec est économique. Dans la production alimentaire, le prix de vente est fixé par le marché et les distributeurs plutôt que par les

producteurs. Résultat : les marges de profit sont très minces pour les producteurs. Le gaz naturel est présentement une source d'énergie de chauffage beaucoup plus accessible pour les producteurs. Cela pourrait changer avec de l'aide financière pour l'utilisation d'électricité ou une internalisation accrue des coûts environnementaux avec des taxes ou un marché carbone plus forts. Avec ces nouveaux paramètres, il serait intéressant d'analyser davantage de sources énergétiques en réalisant par exemple une ACV comparative sur les sources d'énergie de chauffage disponibles au Québec. Une telle étude pourrait ainsi comparer l'utilisation du biogaz, des résidus forestiers, de la géothermie de surface ou encore l'utilisation de réseaux de chaleur dans un contexte d'écologie industrielle (utilisation des surplus de chaleur de centres de données par exemple).

Bien que de façon générale au Québec il faille prioriser les changements en transport pour réduire les GES, ce n'est pas le cas pour le produit de la tomate. Dès qu'une source d'énergie fossile est utilisée pour chauffer les espaces d'agriculture, cette consommation représente jusqu'à 84% du score de réchauffement climatique potentiel comparativement à 12% pour le transport. L'analyse de sensibilité effectuée démontre également que l'augmentation de la distance de transport jusqu'à 900 km n'affecte pas les tendances des résultats. Ces résultats abondent dans le même sens que ceux précédemment obtenus par Goldstein et al. (2016b). Ainsi, les tomates provenant d'une serre chauffée au gaz dans le sud de l'Ontario auraient moins d'impacts dans les catégories de dommages de la qualité des écosystèmes et de la santé humaine que les tomates produites à Montréal à l'intérieur d'eAIB utilisant de l'éclairage électrique.

CONCLUSION

Une première calibration d'une serre contrôlée à l'aide d'outils de SPB a été effectuée en négligeant les gains thermiques des plantes pour une culture de faible densité. Les aspects les plus importants à valider lors de la calibration d'une serre sont la résistance thermique de l'enveloppe, les débits de ventilation et les pertes par le sol.

L'intégration des gains thermiques des plantes dans les outils de SPB a été testée et adaptée. Il manque toutefois une approche généralisée pour la conception et l'analyse d'eAIB avec de tels gains. Les modèles intégrés mériteraient également une nouvelle validation expérimentale. La gestion de ces gains est potentiellement l'un des processus ayant le plus d'impacts sur la consommation énergétique et l'environnement.

L'isolation du mur Nord est la mesure d'économie d'énergie la plus accessible et avec la meilleure PRI. À petite échelle, l'intégration d'éléments de design de bâtiments solaires passifs servirait davantage la rentabilité que la maximisation de l'ensoleillement. Une analyse d'un bâtiment faisant uniquement la culture passive dans un climat québécois (rendement inférieur) serait pertinente.

L'une des principales barrières à la construction de serres sur toit serait les coûts en capitaux qui seraient proportionnellement plus grands pour des serres de grandes superficies. Pour des serres de petite taille, l'intégration d'une serre au toit d'un bâtiment est le scénario avec le moins d'impacts potentiels dans les catégories de dommages à la qualité des écosystèmes et à la santé humaine. L'eAIB utilisant à la fois de l'éclairage naturel et électrique est le scénario avec le moins d'impacts potentiels dans les catégories de dommages des changements climatiques et d'épuisement des ressources.

Même dans un contexte énergétique grandement influencé par le chauffage et une électricité presque entièrement renouvelable, la culture la plus soutenable de la tomate passe par l'utilisation de l'éclairage naturel. Pour les espaces d'agriculture comme les serres, la priorité doit être donnée à la réduction de l'énergie de chauffage et à l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable. Pour les espaces d'agriculture intégrés au bâtiment, la priorité doit être donnée à la maximisation de l'éclairage naturel et à l'intégration des synergies possibles avec le bâtiment. Dès qu'une source de combustible fossile est utilisée pour chauffer une serre ou un eAIB, l'impact du transport n'influence pas les tendances des résultats. Autrement dit, la réduction de la consommation énergétique et la transition vers une source énergétique renouvelable doivent se faire avant la réduction du transport pour réduire l'impact environnemental. Ces priorités seraient davantage accentuées dans une optique d'électrification des transports. Il n'en demeure pas moins que la réduction du transport et la favorisation de circuits courts demeurent nécessaires. L'agriculture urbaine est une excellente piste pour ces enjeux. Toutefois, les coûts de propriétés et de construction étant plus élevés en ville, l'implantation de ces modèles d'agriculture ne doit pas se faire au détriment de l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable pour le chauffage dans une optique de réduction des coûts ou de viabilité économique.

Il faudrait également se questionner sur la taille et le type des espaces à prioriser. Doit-on continuer d'encourager les grands espaces à haut rendement? Ou devrait-on promouvoir davantage la multiplication de petits espaces à plus faible rendement? Ce genre d'analyse devrait se faire en tenant compte des impacts environnementaux sociaux et économiques. L'approche utilisée par Sanyé-Mengual (2015) pour l'agriculture sur toit gagnerait à être étendue à d'autres types d'agriculture urbaine comme les eAIB intérieurs.

ANNEXE I

CALIBRATION D'UN MODÈLE ÉNERGÉTIQUE ET ANALYSE ÉCONOMIQUE DE MESURES DE CONSERVATION D'ÉNERGIE D'UNE SERRE COMMUNAUTAIRE À MONTRÉAL

Frédéric Léveillé-Guillemette ^a, Danielle Monfet ^b

^{a,b} Département de Génie de la construction, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada, H3C 1K3

Article présenté à eSim2018, 10^e conférence d'IBPSA-Canada, Montréal

Résumé : *L'agriculture en environnement contrôlé connaît une très forte croissance. Ce type de culture permet souvent une meilleure productivité, mais est toutefois très énergivore, surtout dans un climat nordique. L'objectif de cette étude est de comparer différentes mesures de conservation de l'énergie (MCE) pour une serre construite à Montréal et opérant à longueur d'année. Un modèle énergétique est monté dans OpenStudio puis calibré avec des données mesurées sur le site, soit les conditions internes et les consommations énergétiques de chauffage. Différents scénarios sont par la suite modélisés avec le modèle calibré et les économies d'énergie attendues sont reprises dans une analyse des coûts. Les économies d'énergie attendues varient entre 5 % et 30 % pour les mesures étudiées. Les périodes de retour sur investissement (PRI) des mesures sont très variables, mais semblent plus adaptées à des serres de plus grandes superficies. L'isolation du mur Nord est la mesure avec la meilleure PRI variant entre 11 et 16 ans.*

Mots clés : *Serres, analyse des coûts du cycle de vie (ACCV), calibration, mesures de conservation d'énergie*

1. Introduction

L'agriculture en environnement contrôlé connaît une très forte croissance. De plus en plus de producteurs cultivent en serre, dans des conteneurs ou même directement dans des bâtiments. Ce type de culture permet souvent une meilleure productivité, mais est toutefois très énergivore, surtout dans un climat nordique. Au Québec, les coûts de chauffage sont la

deuxième plus grande dépense après les salaires et peuvent représenter 30 % des coûts annuels de production (AGÉCO, 2011).

Plusieurs guides et conseils ont été mis de l'avant lors de la dernière montée des prix de combustible en 2008 pour réduire la consommation énergétique des serres. (Nature Québec 2010). Des audits énergétiques ont même été réalisés dans plusieurs serres. Toutefois, peu d'analyse a été effectuée sur la quantification des économies attendues et obtenues des différentes mesures proposées et réalisées. L'une des raisons évoquées est l'absence d'outils de simulation permettant une quantification rapide des économies d'énergie (Syndicat des producteurs en serre du Québec, 2011). Certaines études offrent une quantification des économies attendues pour des serres en climat nordique (De Zwart, 1996, Villeneuve, De Halleux et al., 2005, Gilli, Kempkes et al., 2017, Kempkes, De Zwart et al., 2017). Toutefois, les économies peuvent varier énormément selon le modèle de serre et les aspects économiques sont très rarement abordés dans ces études.

Les logiciels de simulation de la performance énergétique de bâtiment ont connu un développement soutenu dans les dernières années. Certaines études commencent d'ailleurs à utiliser ces logiciels pour l'analyse d'espaces de cultures en environnement contrôlé (Kokogiannakis and Cooper, 2015, Ward, Choudhary et al., 2015, Benis, Reinhart et al., 2017, Nadal, Llorach-Massana et al., 2017). Cependant, dans la majorité des cas, ces études n'ont pas fait de calibration des consommations énergétiques de leurs modèles.

Cette étude vise à détailler la calibration d'une serre communautaire de petite taille avec un logiciel de simulation de performance énergétique du bâtiment libre d'accès. Le modèle calibré est utilisé comme un archétype pour le calcul des économies d'énergie et périodes de retour sur l'investissement (PRI) attendues de certaines mesures de conservation de l'énergie (MCE) dans le contexte énergétique québécois.

2. Description de la serre

La serre est une construction neuve qui a été mise en service en mars 2017. C'est une serre en arche d'acier de 7.62 m X 15.24 m d'une hauteur de 3.66 m avec une orientation Est-Ouest de sa longueur (Figure-A I-1). La structure est ancrée dans une semelle de béton, mais son

plancher (membrane) repose sur de la pierre concassée. Aucune dalle ou isolation n'est présente. Les murs Est et Ouest sont fait de polycarbonate rigide alors que le reste de l'enveloppe est composée de polyéthylène double-parois soufflées à l'air. L'infiltration par l'enveloppe est estimée à 0.6 changement d'air à l'heure (CAH) (ASHRAE, 2015). La charge d'éclairage est négligée puisqu'aucun éclairage artificiel n'est installé pour les plantes.

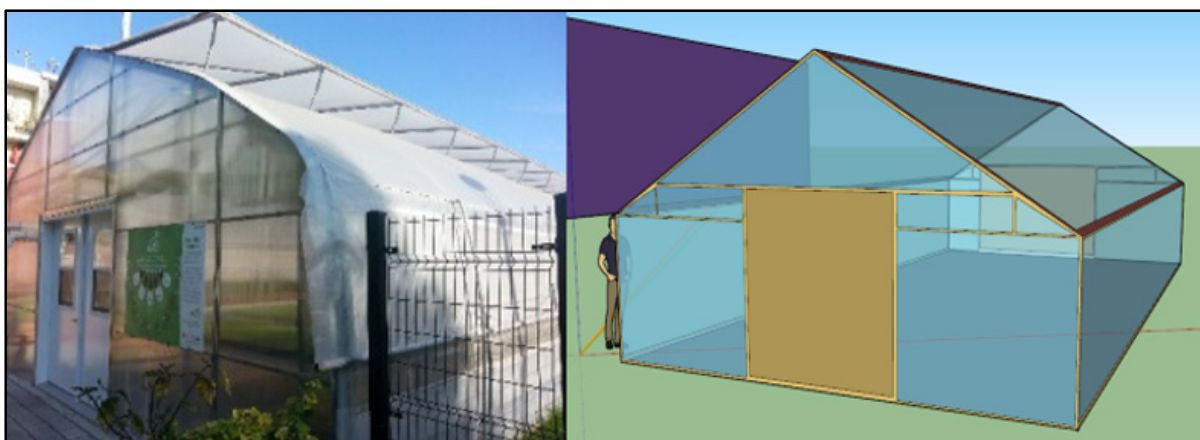


Figure-A I-1 Images de la serre

La serre dispose d'un système de contrôle et de collecte de données en opération depuis le mois d'avril 2017. Les données colligées dans la serre sont principalement la température et l'humidité. Présentement, le système de contrôle maintient la température de la serre selon des consignes en hiver et en été. Les demandes en chauffage sont comblées par un brûleur au gaz naturel d'une capacité de 45 kW. Aucun système de climatisation n'est installé dans la serre; le maintien des conditions intérieures en été se fait par l'ouverture automatisée des fenêtres aux murs Nord et Sud ainsi qu'au toit. Les températures de consignes varient entre 18 °C en chauffage et 25 °C en climatisation. La densité de culture de la serre récemment inaugurée est assez basse et les charges liées aux plantes sont donc négligées dans cette étude.

3. Calibration

Dans le cadre de cette étude, le logiciel EnergyPlus (Crawley, Lawrie et al., 2001) avec l'interface utilisateur OpenStudio V2.2 (Guglielmetti, Macumber et al., 2011) sont utilisés. Cette étude utilise la méthodologie proposée par Raftery, Keane et al. (2011), qui est une approche itérative où les modifications apportées au modèle sont effectuées dans un ordre de priorités établies en fonction de la fiabilité des sources utilisées. La liste suggérée des catégories de fiabilité est la suivante : (1) mesure enregistrée; (2) mesure ponctuelle; (3) observation directe (visite du site); (4) entrevue du personnel d'opération; (5) documents d'opération et de maintenance; (6) documents de mise en service (ex : plans tels que construits); (7) études de références et guides des meilleures pratiques; (8) standards et lignes directrices; (9) informations de la phase de conception. Les priorités établies pour les éléments modélisées dans cette étude sont détaillées à l'ANNEXE II.

Le modèle est calibré sur les consommations de chauffage ainsi que sur les températures internes. Les critères des lignes directrices de l'ASHRAE 14-2002 (ASHRAE, 2002) stipulent que le modèle est considéré calibré si l'erreur de biais moyenne normalisée (NMBE) et le coefficient de variation de l'erreur moyenne quadratique (CVRMSE) sont respectivement à $\pm 5\%$ et $\pm 15\%$ d'écart par rapport aux consommations mensuelles d'une année complète. Les données de consommation de gaz et de températures internes sont de mars 2017 à août 2017, soit depuis la mise en marche de la serre à la réalisation de l'étude. Les données de consommation de gaz sont collectées mensuellement et les températures internes sont collectées toutes les 10 secondes. Les données météo, températures, vents et rayonnement solaire, pour la même période proviennent d'une station météo à proximité (SIMEB, 2017).

La serre étudiée est ventilée de façon naturelle, mais ne dispose pas de capteurs de débit. Ainsi, la calibration de la température est effectuée en minimisant l'erreur quadratique moyenne (RMSE) des températures simulées et mesurées ainsi qu'en augmentant le degré d'ajustement (goodness of fit G) (Chakraborty & Elzarka, 2017).

Ainsi, les paramètres sur lesquels la calibration itérative a été effectuée sont dans l'ordre : (1) la température maintenue dans la serre; (2) la température du sol; 3) les propriétés thermiques des fenêtres (U); et (4) le débit de ventilation naturelle. La Figure-A I-2 représente les consommations mesurées et simulées avant la calibration du modèle. Le CVRMSE et NMBE sont de 53.4 % et 39.7 %, respectivement.

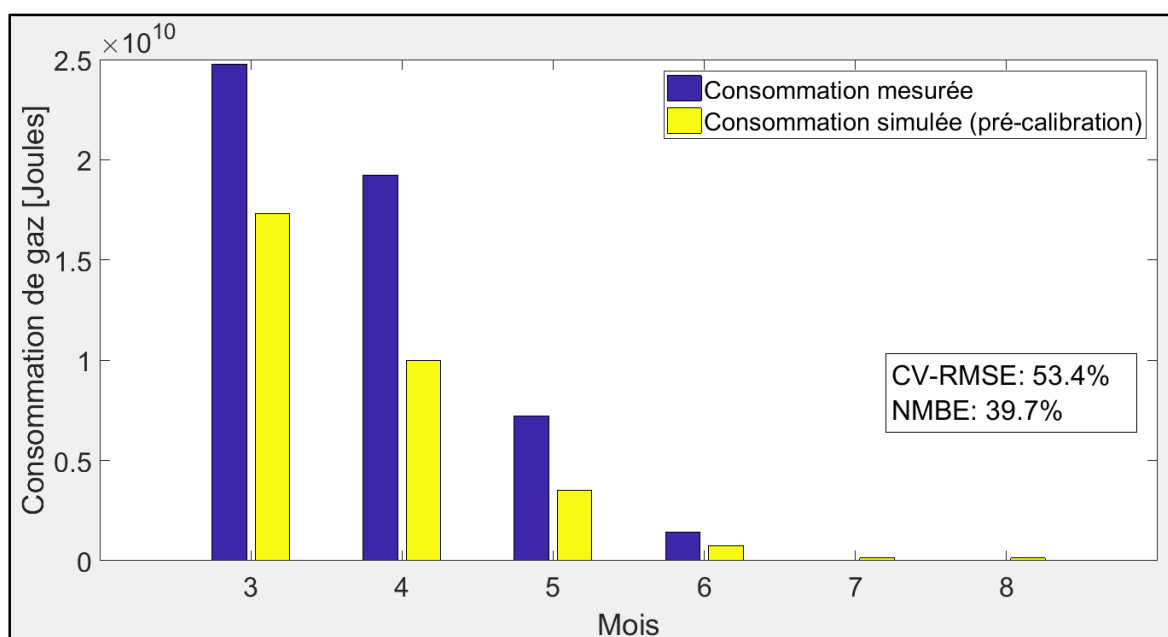


Figure-A I-2 Consommation mensuelle de gaz mesurée et simulée, mars à août 2017

Les modifications effectuées lors de la calibration visent à augmenter la consommation énergétique du modèle puisque cette dernière est inférieure à la réalité.

3.1. Température maintenue dans la serre

La température (T_{in}) maintenue dans la serre est contrôlée selon le point de consigne défini dans la séquence de contrôle, soit environ 18 °C de nuit et 18.5 °C de jour. Toutefois, les mesures de température de la serre démontrent que la température maintenue est supérieure à cette valeur (Figure-A I-3).

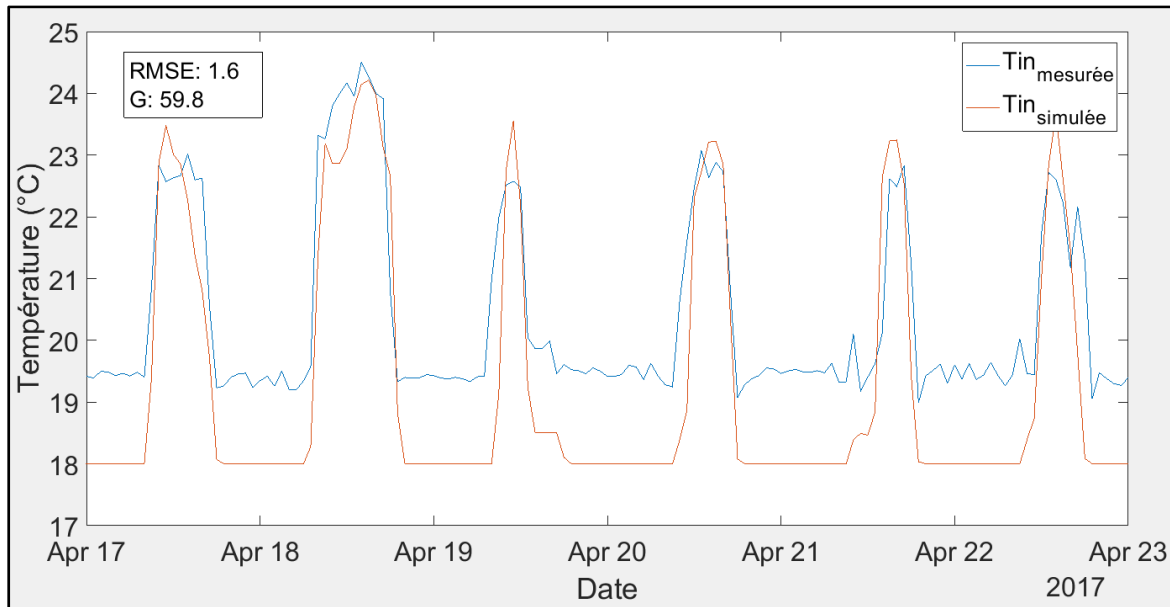


Figure-A I-3 Variation de la température de la serre mesurée et simulée, 17-23/04/2017

Cette variation est liée au surdimensionnement de l'équipement de chauffage au gaz. Dans la serre, le chauffage au gaz fonctionne de façon cyclique avec un temps de fonctionnement de 5 à 10 minutes amenant une augmentation de la température de la serre qui peut atteindre 22 °C. Dans le modèle énergétique, contrairement au fonctionnement réel de l'équipement, le point de consigne est respecté en tout temps. Afin d'identifier le point de consigne permettant de représenter la température de la serre, celui-ci est revu à la hausse de 1 °C et 2 °C (Figure-A I-4). Le tableau A-I-1 présente les différents indices statistiques obtenus pour ces consignes.

Les modifications du point de consigne permettent une meilleure représentation du point de consigne dans la serre. Lorsque le point de consigne est de 19-19.5 °C, le RMSE est minimisé et le G maximisé. La consommation est toutefois moins bien calibrée avec un CVRMSE et une NMBE plus élevée que pour un point de consigne de 20-20.5 °C. Suite à cette analyse, le point de consigne pour compléter la calibration est tout de même fixé à 19-19.5 °C.

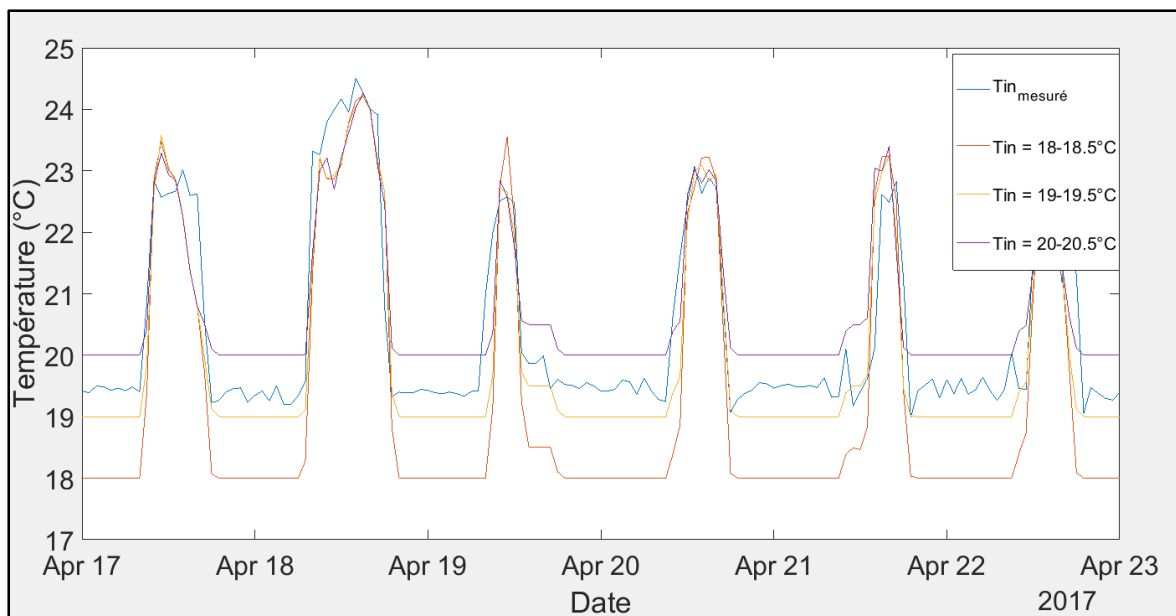


Figure-A I-4 Comparaison de la température de la serre mesurée et simulée selon les points de consignes, 17-23/04/2017

Tableau-A I-1 Comparaison de la température et de la consommation de gaz mesurée et simulée pour différents points de consigne, mars à août 2017

Version 1	T_{in} [C°]		Consommation de gaz [J]	
Température de consigne nuit-jour	RMSE	G	CVRMSE	NMBE
18-18.5 °C	1.8	54.9	53.4 %	39.7 %
19-19.5 °C	1.7	57.5	40.0 %	28.7 %
20-20.5 °C	1.7	56.7	25.7 %	16.5 %

3.2. Température du sol

Quatre méthodes sont actuellement disponibles pour la modélisation du transfert thermique au travers la dalle (ou le plancher sans dalle dans le cas de cette étude) dans le logiciel EnergyPlus

pour estimer la température du sol (T_{sol}). Ces méthodes ainsi que leurs avantages sont résumés au Tableau A-I-2.

La méthode par défaut de conduction par le sol, celle du Ground, est retenue pour cette étude puisqu'elle permet de modifier rapidement à la fois la construction du plancher et la température du sol sous la serre directement dans OpenStudio. La documentation d'EnergyPlus recommande d'utiliser une température de 2 °C sous la température de consigne de la zone pour des bâtiments commerciaux (U.S. Department of Energy, 2017). Toutefois, il est également spécifié que pour de petits bâtiments commerciaux ou pour des bâtiments résidentiels, la température devrait se situer entre cette température et la température du sol à 0.5 m de profondeur disponible dans les fichiers météo. L'impact de plusieurs températures du sol oscillant entre la température de la serre (T_{in}) et la température à 0.5 m ($T_{0.5m}$) est évalué (Figure A-I-5). Les résultats sont détaillés dans le Tableau-A I-3.

Tableau-A I-2 Comparaison des méthodes de conduction par le sol d'EnergyPlus

Nom	Intégration OS	Représentativité	Calibration
FC Factor	Oui	Faible	Facile
Ground	Oui	Moyenne	Facile
Kiva	Non	Bonne	Complexe
Ground domain	Non	Bonne	Complexe

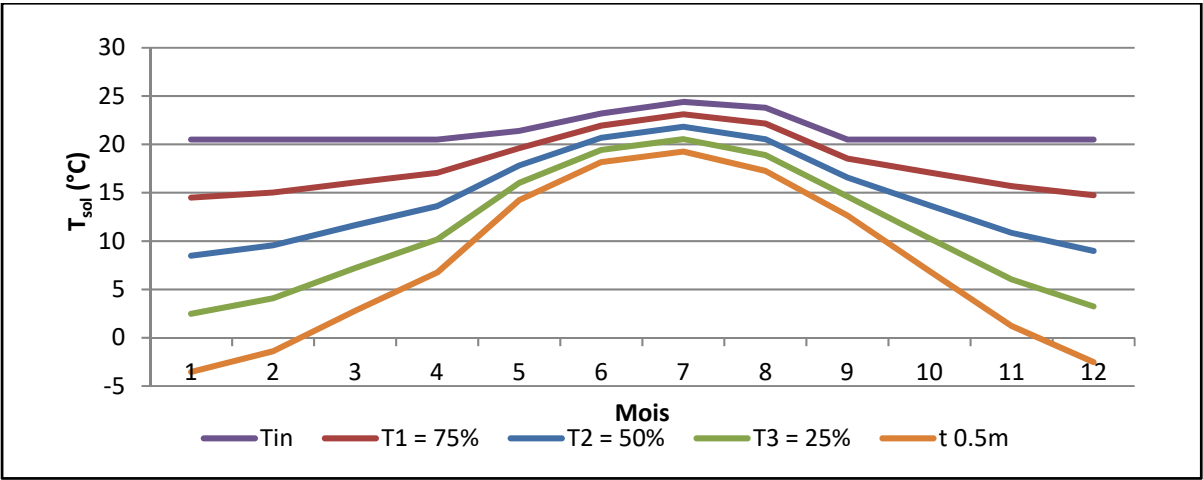


Figure-A I-5 Températures du sol sous le bâtiment évaluées

Tableau-A I-3 Comparaison de la température et de la consommation de gaz mesurée et simulée pour différentes températures du sol sous le bâtiment, mars à août 2017

Version 2	T_{in} [C°]		Consommation de gaz [J]	
Scénario	RMSE	G	CVRMSE	NMBE
T _{in}	1.7	57.5	40.0 %	28.7 %
2°C sous T _{in}	1.9	52.8	44.7 %	33.6 %
75% entre T _{0.5m} et T _{in} (T1)	1.9	51.7	38.3 %	28.9 %
15% entre T _{0.5m} et T _{in}	1.7	57.0	18.7 %	-3.8 %
T _{0.5m}	1.7	57.2	27.1 %	-12.9 %
50% entre T _{0.5m} et T _{in} (T2)	1.8	54.7	23.5 %	16.0 %
25% entre T _{0.5m} et T _{in} (T3)	1.7	56.6	16.2 %	2.1 %
20% entre T _{0.5m} et T _{in}	1.7	56.8	16.9 %	-0.8 %

Pour une température du sol à 25 % entre la température du sol à 0.5 m de profondeur et la température moyenne à l'intérieur, le RMSE est de 1.7, le G de 56.6 % et le CVRMSE et NMBE de 16.2 % et 2.1 %, respectivement. Pour ces températures du sol, la condensation au sol, problème énoncé par l'opérateur de la serre, est possible. De plus, les températures sous une serre non insulée tendent à se rapprocher de la température extérieure (Nawalany, Bieda et al.,

2014). La calibration est poursuivie avec les températures mensuelles T3 (entre 3 °C et 20 °C) pour l'échange par le sol.

3.3. Propriétés thermiques des fenêtres

La modification des paramètres physiques de l'enveloppe peut influencer la consommation énergétique de la même façon qu'en modifiant la température du sol. C'est-à-dire qu'il est possible d'augmenter les pertes du modèle en modélisant une moins bonne enveloppe ou une température de sol plus froide. L'approche de calibration veut qu'une fois qu'une modification est effectuée au modèle, il ne devrait pas être possible de revenir à une version précédente. La variation des paramètres de l'enveloppe, les propriétés thermiques des fenêtres, est donc effectuée uniquement pour la température de sol retenue précédemment. Le Tableau-A I-4 résume les indices statistiques pour les différentes configurations testées.

Tableau-A I-4 Comparaison de la température et de la consommation de gaz mesurée et simulée pour différentes caractéristiques d'enveloppe, mars à août 2017

Version 3	T_{in} [C°]		Consommation de gaz [J]	
Scénario	RMSE	G	CVRMSE	NMBE
4 W/m ² °C	1.7	56.6	16.2 %	2.1 %
+5%	1.8	55.2	17.1 %	-0.1 %
-5%	1.7	57.8	15.5 %	4.4 %
-10%	1.6	58.8	15.7 %	6.7 %

Une diminution de 5 % des coefficients globaux de transmission thermique des fenêtres représente respectivement des coefficients de 3.8 W/m²K pour le polyéthylène et de 3.52 W/m²K pour le polycarbonate. Pour ces valeurs, le RMSE et le G de la température sont de 1.7 et de 57.8 et le CVRMSE et NMBE de 15.5 % et 4.4 % respectivement. Cette

configuration obtient les meilleurs indices statistiques et la calibration est poursuivie avec ces valeurs de coefficients.

3.4. Débit de ventilation naturelle

Plusieurs méthodes sont disponibles pour simuler la ventilation naturelle dans EnergyPlus. La méthode retenue pour cette étude est de fixer un débit de conception pour la ventilation naturelle (ventilation design flow rate). Concrètement, cela revient à modéliser un « équipement » de ventilation naturelle qui assure l'apport d'air extérieur directement dans la zone pour le maintien des conditions. Cette méthode est sélectionnée pour sa simplicité d'utilisation. La différence principale avec les autres méthodes est que le débit de ventilation est un paramètre d'entrée pour cette méthode. Ce débit est ensuite ajusté par des facteurs environnementaux conformément à l'équation (5.1).

$$\text{Ventilation} = (V_{\text{design}}) (F_{\text{schedule}}) [A + B |T_{\text{zone}} - T_{\text{odb}}| + C (\text{WindSpeed}) + D(\text{WindSpeed}^2)] \quad (5.1)$$

Le paramètre A est une constante adimensionnelle fixée par l'utilisateur qui n'est affectée par aucun facteur environnemental. Le paramètre B est le coefficient de température et est influencé par la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Les facteurs C et D sont influencés par la vitesse du vent. La documentation d'EnergyPlus suggère des valeurs par défaut de 0.606, 0.03636, 0.1177 et 0 pour les coefficients A, B, C et D respectivement (U.S. Department of Energy, 2017). Le paramètre F_{schedule} représente l'horaire d'ouverture des fenêtres. Dans le cas de cette étude, ce paramètre est fixé à 1; les fenêtres s'ouvrent à n'importe quel moment dès que la consigne de climatisation est dépassée. Le débit de conception est estimé lors d'une première itération en calculant le débit au travers les ouvertures à partir des équations de Bernoulli simplifiées (CIBSE, 2005). Ce débit est calculé pour chaque ouverture à partir de l'équation (5.2).

$$q_i = C_{di} A_i S_i \sqrt{\frac{2|\Delta p_i|}{\rho_0}} \quad (5.2)$$

où C_{di} est le coefficient de décharge de l'ouverture ; A_i est l'aire totale de l'ouverture; S_i est le coefficient du sens du débit (1 ou -1); Δp_i est la différence de pression de l'ouverture; ρ_0 est la densité de l'air au niveau du sol.

La différence de pression est influencée par les hauteurs, les températures et les vitesses des vents. Pour une différence de température de 3 °C avec l'extérieur, une vitesse de vent nulle et un coefficient de décharge de 0.6, le débit maximal qui peut traverser l'ouverture du haut est d'environ 1.5 m³/s soit 17 CAH. Comme la température intérieure simulée est supérieure à la température mesurée, les débits sont augmentés. Le Tableau-A-I-5 résume les résultats pour différents débits testés.

Avec une différence de température de 5 à 10°C entre l'intérieur et l'extérieur, un débit de 33.9 CAH est tout à fait possible. De plus, cette valeur est influencée par la vitesse du vent et la température. Le débit moyen simulé lorsque la ventilation est active avec un débit de design de 33.9 CAH est en fait 22.6 CAH. À partir de plus de 33.9 CAH, les écarts sur les températures internes mesurées et simulées commencent à augmenter et le degré d'ajustement des courbes diminue. Le reste de l'étude est donc effectuée avec cette valeur pour la ventilation naturelle. La Figure A-I-6 présente les consommations de gaz mesurées ainsi que celles du modèle initial et calibré.

Tableau-A I-5 Comparaison de la température et de la consommation de gaz mesurée et simulée pour différents débits de ventilation naturelle, mars à août 2017

Version 4 Débits [CAH]	T _{in} [C°]		Consommation de gaz [J]	
	RMSE	G	CVRMSE	NMBE
17.0	1.7	57.8	15.5 %	4.4 %
22.6	1.4	64.1	15.5 %	1.7 %
28.3	1.3	66.6	15.1 %	0.2 %
33.9	1.3	66.9	14.7 %	-0.9 %
39.6	1.32	66.3	14.2 %	-2.5 %

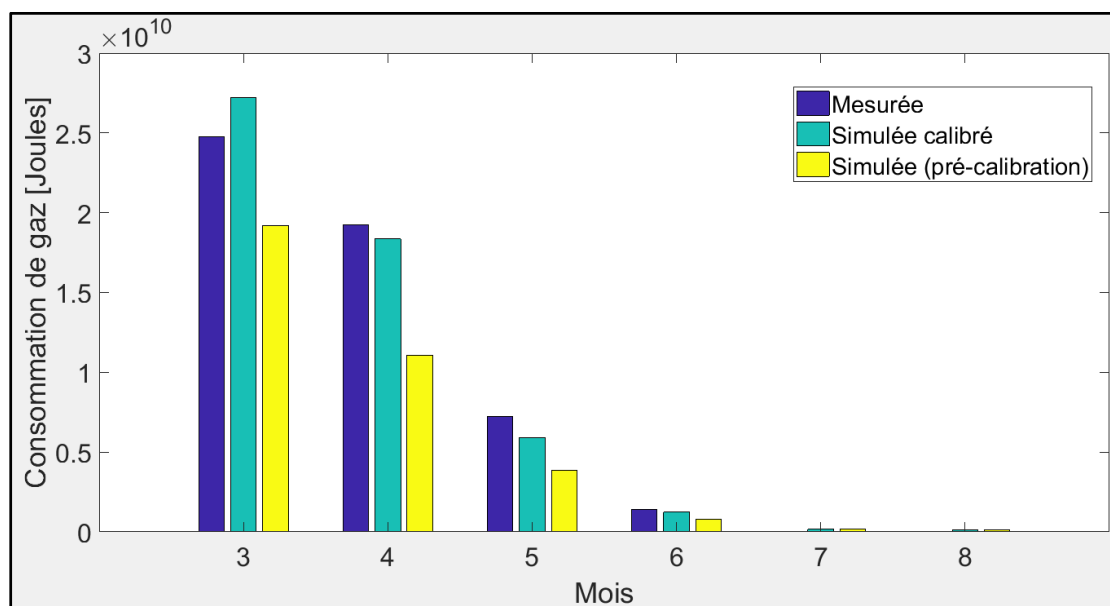


Figure-A I-6 Consommation mensuelle de gaz mesurée et calibrée mars à août 2017

4. Analyse de coûts des mesures d'économie d'énergie

L'analyse des coûts sur le cycle de vie des mesures d'économie d'énergie est effectuée avec la valeur actualisée nette. Les coûts des mesures sont principalement pris dans la littérature (Syndicat des producteurs en serre du Québec, 2013) ainsi qu'auprès de fournisseurs locaux. Les coûts de main-d'œuvre sont négligés lorsque l'application de la mesure ne requiert pas de compétence spécialisée (ex. l'installation d'isolant). Le taux d'actualisation est calculé à -0,7 % avec un taux d'inflation de 2 % et un taux d'escompte de 1,23 % (Banque du Canada, 2018) selon la méthode proposée par ASHRAE (2007). L'analyse considère un coût de base de 3,36 \$/GJ du gaz naturel ainsi qu'une augmentation annuelle du coût de l'énergie de 1 % (moyennes sur les 5 dernières années) (Énergir, 2018).

Pour ce qui est des mesures d'économie d'énergie dans les serres, ces dernières peuvent être séparées en trois grandes catégories : l'amélioration des systèmes de chauffage, l'amélioration

du bâtiment, l'implantation de systèmes de conservation d'énergie ou d'énergies renouvelables.

4.1. Amélioration du système de chauffage

De façon générale, les serres en opération au Québec sont assez âgées et disposent de vieux équipements de chauffage peu efficace (Syndicat des producteurs en serre du Québec, 2011). Des économies d'énergie peuvent alors être réalisées simplement en isolant davantage des équipements comme les chaudières et le réseau de distribution de chaleur. Dans le cadre de cette étude, le système de chauffage est assez récent et très efficace (93 %). La distribution est également bonne puisqu'elle est assurée par des ventilateurs de circulation. Aucune mesure de cette catégorie n'est donc traitée dans cette étude.

4.2. Amélioration du bâtiment

Les mesures les plus efficaces de cette catégorie sont l'isolation des murs et l'installation de rideaux thermiques. Deux scénarios sont ainsi testés : (1) l'installation de 10 cm de polystyrène extrudé (0.35 RSI/cm) sur le mur Nord recouvert d'un fini réfléchissant et (2) l'installation de rideaux thermiques aux fenêtres du toit, contrôlés selon un horaire et fermés le soir de 20h00 à 4h00. Les caractéristiques des matériaux sont présentées à l'ANNEXE III.

Ces mesures peuvent cependant avoir un impact sur la productivité puisqu'elles réduisent la quantité de lumière naturelle disponible pour les plantes. Sans analyser l'impact sur la productivité, la réduction de l'ensoleillement au sol est tout de même calculée pour ces mesures en utilisant la radiation solaire absorbée au sol comme métrique.

4.3. Systèmes de conservation d'énergie

Les mesures de cette catégorie ne sont pas extensivement analysées dans le cadre de cette étude. Ce sont des mesures qui demandent généralement l'installation d'équipements coûteux et dont la rentabilité n'est pas assurée (De Zwart, 1996). Les installations géothermiques ou

solaires sont de bons exemples de cette catégorie (Aye, Fuller et al. 2010, Kıyan, Bingöl et al., 2013).

Cette étude fait toutefois l'analyse de deux scénarios de conservation de l'énergie : (1) l'ajout de masse thermique sur le mur nord et (2) l'implantation de la serre sur un toit de bâtiment commercial.

Pour l'ajout d'une masse thermique, la construction du mur Nord est modifiée avec l'ajout de 0.2 m d'argile. Cette épaisseur serait près d'un optimal pour la réduction des écarts journaliers en température (Bastien and Athienitis, 2017) et l'argile est dans les matériaux les plus abordables et accessibles.

L'implantation de la serre sur un toit est effectuée sur un bâtiment conforme aux lignes directrices du standard ASHRAE 189.1-2009 (ANSI/ASHRAE/USGBC/IES, 2009). La construction d'une serre sur un toit doit se faire conformément au Code Nationale du Bâtiment (CNB) alors que la construction de serre sur sol doit se faire conformément au Code Nationale du Bâtiment Agricole (CNBA). Dans le cadre de cette étude, le modèle calibré ne sera pas modifié pour répondre au CNB. Seulement les coûts de construction additionnels seront considérés dans l'analyse des coûts de cette mesure.

5. Résultats et discussion

Une consommation annuelle de 500 kWh/m² est estimée pour le modèle calibré et simulé avec des données météo typiques pour Montréal. En moyenne, au Québec, les serres fonctionnant 12 mois par année consomment près de 850 kWh/m² (Proux-Gobeil and Dion, 2015). La serre étudiée se trouve donc dans le même ordre de grandeur, mais pourrait être considérée comme une serre assez performante. Deux facteurs peuvent expliquer cet écart avec la moyenne : la taille réduite de la serre (les serres commerciales au Québec ont une superficie moyenne de

2900 m² (Statistique Canada, 2016)) ainsi que son type de construction récent (mur double parois).

Le Tableau A-I-6 présente les économies d'énergie attendues des différentes MCE ainsi que les PRI attendues. Il peut être observé de ces premiers résultats que les mesures avec le retour sur l'investissement le plus rapide sont les mesures générant le moins d'économies, mais nécessitant également moins d'investissement. Avec des hypothèses assez conservatrices sur les coûts, seule l'isolation du mur Nord permettrait un retour sur l'investissement sous les 20 ans. Une analyse plus en détails de chaque mesure est effectuée dans les sections suivantes.

Tableau-A I-6 Analyse des coûts pour les MCE

Mesure	Économies [% kWh]	Investissement [\$]	PRI [ans]
Isolation mur Nord	7 %-8 %	537-923	9-16
Rideaux thermiques	13 %-30 %	4872	20-39
Mur de masse	5 %	640-1300	16-28
Serre sur toit	23 %-30 %	5000-76000	20-126

5.1. Isolation du mur Nord

L'isolation du mur Nord, tout comme la construction d'un mur de masse, a un impact sur la quantité de lumière transmise aux plantes. Toutefois, cet impact est assez négligeable. En effet, la quantité totale d'énergie solaire absorbée au sol ne diminuerait que de 2 % entre le modèle avec un mur opaque et le modèle avec un mur vitré.

L'épaisseur initiale de 10 cm de polystyrène a été utilisée en suivant les recommandations de Dupéré (2004). Toutefois, en coupant de moitié l'épaisseur, les économies demeurent tout de

même à 7 % et la PRI descend ainsi à 11 ans. Ainsi, la recommandation est probablement plus adaptée aux serres plus âgées et moins performantes (assez communes au Québec) plutôt qu’au modèle actuellement étudié. Il serait pertinent de revoir ces lignes directrices selon plusieurs modèles de serre.

5.2. Rideaux thermiques

L’utilisation de rideaux thermiques est l’une des MCE souvent énumérée dans la littérature. Les économies attendues pour des serres en climat nordique peuvent aller jusqu’à 30 % (Gilli, Kempkes et al., 2017). Le contrôle des rideaux utilisé dans le cadre de cette étude est le plus simple (à modéliser et à utiliser) et non le plus optimal en termes d’économies. Certaines méthodes se basant sur les températures extérieures et la radiation disponible (Gilli, Kempkes et al., 2017) ou encore sur un bilan énergétique (Bastien, Dermardiros et al., 2015) permettraient effectivement plus d’économies, mais ne sont pas intégrées ni dans EnergyPlus ou OpenStudio.

Toutefois, même en considérant une économie de 30 %, cette MCE aurait un retour sur investissement de 20 ans. Cette mesure semble beaucoup plus adaptée à des serres de plus grande superficie (et hauteur) avec une consommation énergétique totale plus élevée.

5.3. Masse thermique

Les coûts de cette mesure peuvent grandement diminuer en réutilisant la terre retirée lors de l’aménagement de la semelle de la fondation et en considérant l’auto construction par les propriétaires ou utilisateurs de la serre. En supposant des coûts de 600\$ pour les matériaux uniquement (charpente et quincaillerie), cette MCE aurait un retour sur investissement de 16 ans.

L'impact de cette mesure sur la réduction de la consommation énergétique reste toutefois très limité. Ce genre de mesure est plus souvent discuté et analysé dans des serres passives afin d'améliorer les conditions de culture en hiver (Wang, Li et al. 2014, Bastien and Athienitis, 2017). Comme la serre étudiée possède un chauffage actif et une ventilation passive, l'impact sur les conditions de culture de cette mesure se fait ressentir en été. Cet impact est toutefois minimal puisque le modèle simulé avec la masse thermique ne permet qu'une diminution moyenne de 0.3 °C de la température en été ainsi qu'une diminution de 0.1 m³/s (3 %) du débit moyen de ventilation naturelle requis.

5.4. Construction sur toit

La construction d'une serre sur toit augmente considérablement les coûts de construction. Pour cette raison l'analyse présentée dans cette étude est conservatrice. Elle considère les coûts supplémentaires liés à la modification de la structure de la serre pour permettre une charge de neige au toit 4 fois supérieure (tel que prescrit par le CNB). Sont également inclus les coûts liés à l'emploi de main-d'œuvre spécialisée (détenteurs de carte de la Commission de la Construction du Québec - CCQ) pour la construction en hauteur, ainsi que les coûts de modification de la structure du toit du bâtiment ainsi que de la membrane. La construction sur toit peut ainsi facilement tripler ou quadrupler les coûts de construction d'une serre. Même en ne considérant que les coûts supplémentaires de la main-d'œuvre, la PRI serait de 25 ans, ce qui est plus que la durée de vie de la serre.

Cette analyse ne tient compte que des économies d'énergie du côté de la serre. En additionnant les économies d'énergie générées du côté du bâtiment, la PRI descend à 20 ans. L'intégration d'un espace de culture dans un bâtiment ouvrirait également la porte à d'autres synergies comme la recirculation et l'échange d'air vicié (Ercilla-Montserrat, Izquierdo et al., 2017).

6. Conclusion

Les outils de simulation de la performance énergétique du bâtiment tel qu'OpenStudio permettraient une calibration adéquate d'une serre de petite taille. Les modèles les plus simples de ventilation naturelle et de transfert de chaleur par le sol permettraient une modélisation rapide et assez représentative d'un bâtiment agricole. Le modèle étudié a été calibré avec un CVRMSE et un NMBE de 14.7 % et -0.9 % , respectivement sur la consommation de gaz et un RMSE de 1.3 °C et un G de 66.9 sur la température intérieure de la serre. Ce modèle calibré permet d'évaluer l'impact de différentes MCE. Cette calibration est toutefois incomplète conformément aux lignes directrices de l'ASHRAE 14-2002 (ASHRAE, 2002) puisqu'uniquement 6 mois de données étaient disponibles alors qu'il aurait fallu avoir 12 mois de données.

Les résultats et conclusions sont donc à prendre avec parcimonie et l'étude devrait idéalement être refaite sur une année complète. Les MCE souvent analysées dans la littérature visent des serres de grandes superficies et sont peu viables lorsqu'appliquées à une serre de petite taille avec une consommation énergétique moindre. La mesure avec la meilleure PRI pour la serre étudiée est l'isolation du mur Nord avec un PRI variant entre 11 et 16 ans pour 7 % et 8 % d'économie d'énergie respectivement. Une catégorisation des archétypes de serres au Québec serait intéressante afin de mieux cibler les mesures les plus appropriées selon le modèle de serre étudié.

Il est à noter que l'analyse économique présentée est des plus conservatrices. Les prix de gaz naturel utilisés dans le cadre de cette étude sont 12 % sous les prix actuels et l'augmentation des prix est fixée à seulement 1 % pour toute l'analyse. Également, elle n'inclut pas l'internalisation des coûts environnementaux via, par exemple, l'achat de crédits carbone. Cet aspect serait à approfondir.

L'ensemble de ces mesures gagnerait cependant à être envisagée avant la construction de nouvelles serres. Cela permettrait notamment de réduire les coûts en matériaux et main-d'œuvre et pourrait faciliter l'accès au financement en annexant les coûts des mesures aux coûts de construction du bâtiment lui-même. Aussi, il serait pertinent d'analyser des mesures plus complexes telles que l'installation de géothermie ou de panneaux solaires.

La viabilité économique ne devrait toutefois pas être l'unique aspect étudié lors de l'analyse ou l'élaboration d'un projet. Il est aussi important de regarder les aspects environnementaux et sociaux. Pons, Nadal et al. (2015) présentent une analyse de l'ensemble de ces aspects dans l'étude de l'intégration d'une serre à un bâtiment. Il serait pertinent de poursuivre l'analyse présentée dans cet article en s'inspirant de leur méthodologie afin d'avoir un portrait plus complet de la durabilité de l'agriculture en environnement contrôlé dans un contexte québécois. En s'inspirant de la méthodologie de Benis, Reinhart et al. (2017), différents bâtiments pourraient être ainsi comparés : les serres intégrées aux bâtiments, les serres sur sol et les espaces de production intérieurs.

Également, pour des espaces de culture où la densité de culture est plus élevée, il serait pertinent de modéliser l'interaction des plantes avec l'environnement. Des travaux commencent à proposer certaines méthodes pour intégrer ces interactions aux logiciels de simulation de la performance de bâtiment (Kokogiannakis and Cooper 2015, Ward, Choudhary et al., 2015). Cela permettra une meilleure calibration et analyse des coûts associés au contrôle de la température et de l'humidité. Il serait aussi intéressant d'intégrer aux outils libres d'accès actuellement utilisés de nouvelles méthodes de contrôle de l'ombrage (Bastien, Dermardiros et al., 2015) ou des méthodes plus avancées de contrôle de la température intérieure (Gilli, Kempkes et al., 2017).

7. Remerciements

Les auteurs remercient les acteurs du Carrefour alimentaire Centre-Sud et d'AU/LAB, ainsi qu'Énergir et la Ville de Montréal pour avoir partagé l'information nécessaire pour compléter

ce projet. Ce projet aurait été impossible sans le soutien reçu via la bourse de recherche du FRQNT.

ANNEXE II

TOMATO PRODUCTION HEATED GREENHOUSE FLOWS MODIFICATIONS

Tableau-A-II-1 Case 1 - Greenhouse

Flow	Description	Modification	Amount	Unit	Provider
electricity, low voltage	Fans consumption	Modify Amount and Provider	0.917	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
electricity, low voltage	Dehumidification consumption	Flow added	2.06	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
heat, central or small-scale, natural gas	Greenhouse Heating gas consumption	Modify Amount and Provider	10.4	kWh	market for heat, central or small-scale, natural gas heat, central or small-scale, natural gas Cutoff, U - RoW
irrigation	Literature value: total amount of water used for irrigation (Torellas et al. 2012). See supporting documentation 'WFLDB-Documentation.pdf' chapter 'Water use for irrigation' (https://ecoquery.ecoinvent.org/File/Reports).	Modify Provider	0.0141	m3	market for irrigation irrigation Cutoff, U - CA-QC
greenhouse, plastic walls and roof	Greenhouse structure and equipments	Modify construction type (from glass to plastic), amount and provider	0.023208	m2*a	greenhouse construction, plastic walls and roof, metal tubes greenhouse, plastic walls and roof Cutoff, U - RoW

Tableau-A-II-2: Case 2 - Rooftop Greenhouse

Flow	Description	Modification	Amount	Unit	Provider
electricity, low voltage	Fans consumption	Modify Amount and Provider	0.871	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
electricity, low voltage	Dehumidification	Flow added	1.39	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
electricity, low voltage	Building cooling reduction	Flow added	-0.835	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
electricity, low voltage	Building Heating reduction	Flow added	-0.441	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
heat, central or small-scale, natural gas	Greenhouse Heating gas consumption	Modify Amount and Provider	9.11	kWh	market for heat, central or small-scale, natural gas heat, central or small-scale, natural gas Cutoff, U - RoW
irrigation	Literature value: total amount of water used for irrigation (Torellas et al. 2012). See supporting documentation 'WFLDB-Documentation.pdf' chapter 'Water use for irrigation' (https://ecoquery.ecoinvent.org/File/Reports).	Modify Provider	0.0141	m3	market for irrigation irrigation Cutoff, U - CA-QC
greenhouse, plastic walls and roof	Greenhouse structure and equipments	Modify construction type (from glass to plastic), amount and provider	0.023208	m2*a	greenhouse construction, plastic walls and roof, metal tubes greenhouse, plastic walls and roof Cutoff, U - RoW

Tableau-A-II-3:Case 3 - BIAs with natural and electrical lighting (BNEL)

Flow	Description	Modification	Amount	Unit	Provider
electricity, low voltage	Fans consumption	Modify Amount and Provider	2.58	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
electricity, low voltage	Host Building Heating reduction	Flow added	-0.851	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
electricity, low voltage	Cooling and Dehumidification	Flow added	12.8	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
electricity, low voltage	Host Building cooling reduction	Flow added	0.2	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
electricity, low voltage	Host Building Fans reduction	Flow added	0.446	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
electricity, low voltage	Lights consumption	Flow added	33.707	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
greenhouse, plastic walls and roof	Greenhouse structure and equipments	Modify construction type (from glass to plastic), amount and provider	0.02	m2*a	greenhouse construction, plastic walls and roof, metal tubes greenhouse, plastic walls and roof Cutoff, U - RoW
heat, central or small-scale, natural gas	BIAs Heating gas consumption	Modify Amount and Provider	0.133	kWh	market for heat, central or small-scale, natural gas heat, central or small-scale, natural gas Cutoff, U - RoW
irrigation	Literature value: total amount of water used for irrigation (Torellas et al. 2012).	Modify Provider	0.0141	m3	market for irrigation irrigation Cutoff, U - CA-QC

Tableau-A-II-4: Case 4 - BIAs with electrical lighting only (BELO)

Flow	Description	Modification	Amount	Unit	Provider
electricity, low voltage	Fans consumption	Modify Amount and Provider	19.2	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
electricity, low voltage	Host Building Heating reduction	Flow added	6.27	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
electricity, low voltage	Cooling and Dehumidification	Flow added	1.17	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
electricity, low voltage	Host Building cooling reduction	Flow added	-0.775	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
electricity, low voltage	Host Building Fans reduction	Flow added	0.53	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
electricity, low voltage	Lights consumption	Flow added	51.43857	kWh	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CA-QC
greenhouse, plastic walls and roof heat, central or small-scale, natural gas irrigation	Greenhouse structure and equipments	Modify construction type (from glass to plastic), amount and provider	0.02	m2*a	greenhouse construction, plastic walls and roof, metal tubes greenhouse, plastic walls and roof Cutoff, U - RoW
	BIAs Heating gas consumption	Modify Amount and Provider	0.0276	kWh	market for heat, central or small-scale, natural gas heat, central or small-scale, natural gas Cutoff, U - RoW
	Literature value: total amount of water used for irrigation (Torellas et al. 2012).	Modify Provider	0.0141	m3	market for irrigation irrigation Cutoff, U - CA-QC

ANNEXE III

BPS INPUTS

Tableau-A-III-1 Greenhouse envelope and HVAC systems summary

Parameter	Value	Source
Construction		
Polyéthylène double walls		
U	4 W m ⁻² K ⁻¹	(ASHRAE, 2015)
Visible Transmittance (VT)	88%	(Bastien, 2015)
Sensible Heat Gain Coefficient (SHGC)	0.8	
Window toWall Ratio (WWR)	95%	Architectural drawings
Polycarbonate		
U	3.7 W m ⁻² K ⁻¹	(ASHRAE, 2015)
VT	79%	(Bastien, 2015)
SHGC	0.81	Data from manufacturer
WWR	95%	Architectural drawings
Steel structure		
Thickness	3 mm	Architectural drawings
Conductivity	45 W m ⁻¹ K ⁻¹	BCL
Density	7680 kg m ⁻³	BCL
Specific heat	418.4 J kg ⁻¹ K ⁻¹	BCL
Solaire/visible/thermal Absorption	0.6/0.6/0.9	BCL
Ground blanket		
R	0.1 m ² K W ⁻¹	BCL
Solar/visible/ thermal absorption	0.9/0.8/0.8	BCL
HVAC Systems		
Gas burner		
Power	45.43 kW	Operation manuals
Efficiency	93%	Operation manuals
Dx dehumidifier		
Water removal rate	450 L day ⁻¹	Sized for max tomato latent gain
Natural ventilation		
Airflow	3 m ³ s ⁻¹	(CIBSE, 2005) and adjusted with calibration

Tableau-A-III-2 NECB modification to include agricultural space

Parameter	Value	Source
Constructions		
Skylight		
U	0.22 W m ⁻² K ⁻¹	
VT	90%	
Solar transmittance	84	
HVAC Systems		
Gas burner		
Power	45.43 kW	Operation manuals
Efficiency	93%	Operation manuals
Dx dehumidifier		
Water removal rate	450 L day ⁻¹	Sized with max tomato latent load
Natural ventilation		
Airflow	3 m ³ s ⁻¹	(CIBSE, 2005) and adjusted with calibration

ANNEXE IV

ESTIMATED TOMATO PLANT HEAT GAINS

Tableau-A-IV-1 : Sensible and latent loads for 400 ppm CO2 and 80 W m-2 lighting intensity

Interior RH %	Temperature, °C									
	16	18	20	22	24	26	28	30		
70	-88	-133	-184	-238	-290	-332	-356	-355	425	426
	158	203	254	308	360	403	426			
75	-65	-103	-147	-192	-234	-265	-278	-269	339	348
	135	174	217	263	304	335	348			
80	-41	-73	-109	-145	-176	-196	-200	-188	258	270
	111	143	179	215	246	266	270			
85	-16	-41	-68	-95	-116	-126	-124	-112	182	195
	87	112	139	165	186	197	195			
90	9	-8	-26	-43	-54	-57	-52	-41	111	122
	61	78	97	113	125	128	122			

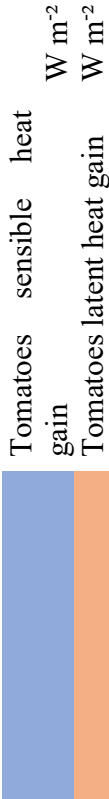


Tableau-A-IV-2: Sensible and latent loads for 400 ppm CO2 and 0 W m-2 lighting intensity

Interior RH %	Temperature, °C									
	16	18	20	22	24	26	28	30		
70	28	41	17	79	-100	100	-109	109	-95	95
	-28	-41	-17	-79	-100	100	-109	109	-95	95
75	23	34	48	66	-82	82	-87	87	-75	75
	-23	-34	-48	-66	-82	82	-87	87	-75	75
80	18	26	38	52	-64	64	-66	66	-57	57
	-18	-26	-38	-52	-64	64	-66	66	-57	57
85	13	19	27	37	-46	46	-45	45	-38	38
	-13	-19	-27	-37	-46	46	-45	45	-38	38
90	8	12	17	22	-27	27	-28	28	-20	20
	-8	-12	-17	-22	-27	27	-28	28	-20	20

ANNEXE V

INPUTS SUMMARY FOR BPS AND LCIA

Data	units	GH	RTGH	BWNL	BWONL	Sources	notes
Tomato cultivation							
Annual surface production	kg·m ⁻² ·yr ⁻¹	43.09	43.09	50.00	50.00	(Dorais, 2003)	
Total building or BIAs floor area	m ²	116.13	116.13	983.54	983.54		(1)
Cultivated surface area	m ²	58.06	58.06	393.42	393.42	(Dorais, 2003)	
Heating setpoint (night-day)	°C	16-20	16-20	16-20	16-20	(Agrisys, 2015)	
Cooling setpoint (night-day)	°C	20-24	20-24	20-24	20-24	(Agrisys, 2015)	
Dehumidification setpoint	%	80%	80%	80%	80%	(Agrisys, 2015)	
Production space structure							
Structure surface per functional unit (FU)	m ² ·yr·FU ⁻¹	0.023	0.023	0.02	0.02		(2)
Structure material		Steel	Steel	Concrete	Concrete		
Envelope material		Polyethylene double layer	Polyethylene double layer	Stucco	Stucco		
Window to wall ratio		90%	90%	75%	0%		

Data	units	GH	RTGH	BWNL	BWONL	Sources	notes
Lighting Systems							
Transmittance of windows	%	90	90	90	N/A		
Electric lighting		no	no	yes	yes		
Photoperiod	h·d ⁻¹	Variable	Variable	16	16	(Dorais, 2003)	
Light efficiency	%	N/A	N/A	30%	30%	(Heuvelink & Dorais, 2005)	
Maximum daily supplemental shortwave radiation sum	J·cm ⁻² ·d ⁻¹	N/A	N/A	740	761		(3)
Required lighting power	W·m ⁻²	N/A	N/A	428	440		
400W HPS lamps installed	unit·m ⁻²	0	0	1	0		
600W HPS lamps installed	unit·m ⁻²	0	0	0	1		

Data	units	GH	RTGH	BWNL	BWNL	Sources	notes
HVAC Equipment							
Heating type	-	Natural gas burner	Natural gas burner	Variable air volume (VAV) with electric reheat	VAV with electric reheat		
Heating coil efficiency	%	93%	93%	100%	100%		
Cooling type	-	Dehumidifier	Natural ventilation and Direct expansion (Dx) dehumidifier	VAV with water coil and Dx dehumidifier	VAV with water coil and Dx dehumidifier		
Cooling coefficient of performance (COP)		-	-	4.5	4.5		
Dehumidification energy factor	mL Wh ⁻¹	3.412	3.412	3.412	3.412		
Building cooling consumption reduction	kWh m ⁻² yr ⁻¹	0	-3.60E+01	10.0202316	26.4848267		
Building heating consumption reduction	kWh m ⁻² yr ⁻¹	0	-1.88E+01	-42.5348904	-38.7391433		
Building fans consumption reduction	kWh m ⁻² yr ⁻¹	0.00E+00	0.00E+00	2.23E+01	5.87E+01		
Annual cooling (or dehumidification) consumption	kWh m ⁻² yr ⁻¹	8.15E+01	5.19E+01	6.40E+02	9.60E+02		
Annual heating consumption	kWh m ⁻² yr ⁻¹	4.98E+02	5.00E+02	6.63E+00	1.38E+00		
Annual fan consumption	kWh m ⁻² yr ⁻¹	4.03E+01	3.92E+01	1.29E+02	3.13E+02		
Cooling consumption per functional unit (FU)	kWh FU ⁻¹	1.89E+00	1.21E+00	1.28E+01	1.92E+01		(4)
Heating consumption per FU	kWh FU ⁻¹	1.16E+01	1.16E+01	1.33E-01	2.76E-02		(5)
Fan consumption per FU	kWh FU ⁻¹	9.34E-01	9.10E-01	2.58E+00	6.27E+00		(6)
Building cooling reduction per FU	kWh FU ⁻¹	0	-8.36E-01	2.00E-01	5.30E-01		(6)
Building heating reduction per FU	kWh FU ⁻¹	0	-4.37E-01	-8.51E-01	-7.75E-01		(6)
Building fans consumption reduction per FU	kWh FU ⁻¹	0.00E+00	0.00E+00	2.23E+01	5.87E+01		(6)

Data	units	GH	RTGH	BWNL	BWONL	Sources	notes
HVAC Equipment							
Heating type	-	Natural gas burner	Natural gas burner	Variable air volume (VAV) with electric reheat	VAV with electric reheat		
Heating coil efficiency	%	93%	93%	100%	100%		
Cooling type	-	Dehumidifier	Natural ventilation and Direct expansion (Dx) dehumidifier	VAV with water coil and Dx dehumidifier	VAV with water coil and Dx dehumidifier		
Cooling coefficient of performance (COP)		-	-	4.5	4.5		
Dehumidification energy factor	mL Wh ⁻¹	3.412	3.412	3.412	3.412		
Building cooling consumption reduction	kWh m ⁻² yr ⁻¹	0	-3.60E+01	10.0202316	26.4848267		
Building heating consumption reduction	kWh m ⁻² yr ⁻¹	0	-1.88E+01	-42.5348904	-38.7391433		
Building fans consumption reduction	kWh m ⁻² yr ⁻¹	0.00E+00	0.00E+00	2.23E+01	5.87E+01		
Annual cooling (or dehumidification) consumption	kWh m ⁻² yr ⁻¹	8.15E+01	5.19E+01	6.40E+02	9.60E+02		

Annual heating consumption	kWh m ⁻² yr ⁻¹	4.98E+02	5.00E+02	6.63E+00	1.38E+00		
Annual fan consumption	kWh m ⁻² yr ⁻¹	4.03E+01	3.92E+01	1.29E+02	3.13E+02		
Cooling consumption per functional unit (FU)	kWh FU ⁻¹	1.89E+00	1.21E+00	1.28E+01	1.92E+01		(4)
Heating consumption per FU	kWh FU ⁻¹	1.16E+01	1.16E+01	1.33E-01	2.76E-02		(5)
Fan consumption per FU	kWh FU ⁻¹	9.34E-01	9.10E-01	2.58E+00	6.27E+00		(6)
Building cooling reduction per FU	kWh FU ⁻¹	0	-8.36E-01	2.00E-01	5.30E-01		(6)
Building heating reduction per FU	kWh FU ⁻¹	0	-4.37E-01	-8.51E-01	-7.75E-01		(6)
Building fans consumption reduction per FU	kWh FU ⁻¹	0.00E+00	0.00E+00	2.23E+01	5.87E+01		(6)

- (1) GH and RTGH surfaces come from a case study on BPS calibration (Léveillé-Guillemette & Monfet, 2018).
- (2) Inverse of crop yield. coinvent process: greenhouse construction, plastic walls and roof, metal tubes | greenhouse, plastic walls and roof | Cutoff, U - RoW
- (3) Calculate daily with BPS. Difference between target and shortwave radiation sum on ground
- (4) Cooling and dehumidification. EI process: market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U - CA-QC
- (5) EI process: market for heat, central or small-scale, natural gas | heat, central or small-scale, natural gas | Cutoff, U - RoW
- (6) EI process: EI process: market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U - CA-QC

References

Agrisys (2015). Production de la tomate de serre au Québec, Syndicat des producteurs en serre du Québec.

Dorais, M. (2003). The use of supplemental lighting for vegetable crop production: light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practices. Canadian Greenhouse Conference, Canada.

Heuvelink, E. and M. Dorais (2005). Crop Growth and Yield. Tomatoes. Wallingford, Oxfordshire, CABI Publishing.

Léveillé-Guillemette, F. and D. Monfet (2018). Calibration d'un modèle énergétique et analyse économique de mesures de conservation d'énergie d'une serre communautaire à Montréal. eSim 2018, 10th conference of IBPSA-Canada. I. Canada. Montreal, IBPSA Canada: 512-521

BIBLIOGRAPHIE

- Agrisys. (2015). *Production de la tomate de serre au Québec*. Syndicat des producteurs en serre du Québec.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2015). *ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications (SI Edition)*. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Repéré à <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASHRAEF2/ashrae-handbook-heating/ashrae-handbook-heating>
- Antón, M. A., Castells, F., Montero, J. I., & Muñoz, P. (2004). Most significant substances of LCA to Mediterranean greenhouse horticulture. Dans *Fourth International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector*.
- ASHRAE. (2002). *ASHRAE Guideline 14-2002: Measurement of Energy and Demand Savings*.
- ASHRAE. (2007). *2007 ASHRAE handbook. Heating, ventilating, and air-conditioning applications*. Atlanta [NE]: American Society of heating refrigerating and air-conditioning engineers.
- ASHRAE. (2015). Chapter 24: Environmental control for animals and plants. Dans *ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications*. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Repéré à <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASHRAEF2/ashrae-handbook-heating/ashrae-handbook-heating>
- Bastien, D. (2015). *Methodology for Enhancing Solar Energy Utilization in Solaria and Greenhouses* (phd thesis, Concordia University, Montreal). Repéré à <http://spectrum.library.concordia.ca/980775/>
- Beckman, W. A., Broman, L., Fiksel, A., Klein, S. A., Lindberg, E., Schuler, M., & Thornton, J. (1994). TRNSYS The most complete solar energy system modeling and simulation software. *Renewable Energy*, 5(1-4), 486-488. doi: 10.1016/0960-1481(94)90420-0.

- Benis, K., Reinhart, C., & Ferrao, P. (2017). Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts. *Journal of Cleaner Production*, 147, 589-602. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.130.
- Bojacá, C. R., Wyckhuys, K. A. G., & Schrevens, E. (2014). Life cycle assessment of Colombian greenhouse tomato production based on farmer-level survey data. *Journal of Cleaner Production*, 69, 26-33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.078>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614001024>
- Bonachela, S., González, A. M., & Fernández, M. D. (2006). Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data. *Irrigation Science*, 25(1), 53. doi: 10.1007/s00271-006-0034-z. Repéré à <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0034-z>
- Boulard, T., Raeppl, C., Brun, R., Lecompte, F., Hayer, F., Carmassi, G., & Gaillard, G. (2011). Environmental impact of greenhouse tomato production in France. *Agronomy for Sustainable Development*, 31(4), 757-777. doi: 10.1007/s13593-011-0031-3.
- Canadian Commission on Building and Fire Codes. (2011). *National Energy Code of Canada for Buildings*. Ottawa, Ontario: National Research Council Canada, Institute for Research in Construction.
- Canadian Commission on Building and Fire Codes. (2015). *National building code of Canada, 2015*. Ottawa, Ontario: National Research Council Canada, Institute for Research in Construction.
- Canakci, M., & Akinci, I. (2006). Energy use pattern analyses of greenhouse vegetable production. *Energy*, 31(8), 1243-1256. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.05.021>.
- Chakraborty, D., & Elzarka, H. (2017). Performance testing of energy models: are we using the right statistical metrics? *Journal of Building Performance Simulation*, 1-16. doi: 10.1080/19401493.2017.1387607.
- CIBSE. (2005). *Natural Ventilation in Non-Domestic Buildings - CIBSE Applications Manual AM10*: CIBSE.
- Clarke, J. A., & Hensen, J. L. M. (2015). Integrated building performance simulation: Progress, prospects and requirements. *Building and Environment*, 91, 294-306. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.04.002.

- Corrado, S., Luzzani, G., Trevisan, M., & Lamastra, L. (2019). Contribution of different life cycle stages to the greenhouse gas emissions associated with three balanced dietary patterns. *Science of the Total Environment*, 660, 622-630. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.267.
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., . . . Glazer, J. (2001). EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319-331. doi: 10.1016/S0378-7788(00)00114-6. Repéré à [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)
- Critten, D. L., & Bailey, B. J. (2002). A review of greenhouse engineering developments during the 1990s. *Agricultural and Forest Meteorology*, 112(1), 1-22. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00057-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00057-6).
- de Halleux, D., & Gauthier, L. (1998). Energy Consumption Due to Dehumidification of Greenhouses under Northern Latitudes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 69(1), 35-42. doi: <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0221>.
- De Zwart, H. (1996). *Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model* (Wageningen, Wageningen, Netherlands).
- Dias, G. M., Ayer, N. W., Khosla, S., Van Acker, R., Young, S. B., Whitney, S., & Hendricks, P. (2017). Life cycle perspectives on the sustainability of Ontario greenhouse tomato production: Benchmarking and improvement opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 140, 831-839. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.039. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.039>
- Dorais, M. (2003). The use of supplemental lighting for vegetable crop production: light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practices. Dans *Canadian Greenhouse Conference*.
- Eaves, J., Eaves, S. (2018), Comparing the Profitability of a Greenhouse to a Vertical Farm in Quebec. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroeconomie*, 66: 43-54. doi:10.1111/cjag.12161
- Ercilla-Montserrat, M., Izquierdo, R., Belmonte, J., Montero, J. I., Muñoz, P., De Linares, C., & Rieradevall, J. (2017). Building-integrated agriculture: A first assessment of aerobiological air quality in rooftop greenhouses (i-RTGs). *Science of the Total Environment*, 598, 109-120. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.099. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85018507354&doi=10.1016%2fj.scitotenv.2017.04.099&partnerID=40&md5=7c0e8d0c6393ddf466c9848ecb3d4e05>

- Esteve-Llorens, X., Darriba, C., Moreira, M. T., Feijoo, G., & González-García, S. (2019). Towards an environmentally sustainable and healthy Atlantic dietary pattern: Life cycle carbon footprint and nutritional quality. *Science of the Total Environment*, 646, 704-715. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.264.
- FAO. (2017). *The future of food and agriculture – Trends and challenges*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fisher, S. (2014). *A case study of urban agriculture: A life cycle assessment of vegetable production* (Ph.D., University of Colorado at Denver, Ann Arbor). Repéré à ProQuest Dissertations & Theses Global.
- Goldstein, B., Birkved, M., Fernández, J., & Hauschild, M. (2016a). Surveying the Environmental Footprint of Urban Food Consumption. *Journal of Industrial Ecology*, 21(1), 151-165. doi: 10.1111/jiec.12384. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12384>
- Goldstein, B., Hauschild, M., Fernández, J., & Birkved, M. (2016b). Testing the environmental performance of urban agriculture as a food supply in northern climates. *Journal of Cleaner Production*, 135, 984-994. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.004>.
- Goldstein, B., Hauschild, M., Fernández, J., & Birkved, M. (2016c). Urban versus conventional agriculture, taxonomy of resource profiles: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 1-19. doi: 10.1007/s13593-015-0348-4.
- Gouvernement du Canada. (2016). *Stratégie fédérale de développement durable pour le Canada*. Repéré à http://fsds-sfdd.ca/index_fr.html#/fr/intro/.
- Gouvernement du Québec. (2016). *Politique Énergétique 2030: L'énergie des Québécois source de croissance*. Repéré à <http://politiqueenergetique.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/politique-energetique-2030.pdf>.
- Government of Canada. (2018a). Canadian Climate Normals 1981-2010 Station Data. Repéré le 2018-12-10
- Government of Canada. (2018b). Engineering Climate Datasets. Repéré le 2018-12-06 à http://climate.weather.gc.ca/prods_servs/engineering_e.html
- Graamans, L., van den Dobbelsteen, A., Meinen, E., & Stanghellini, C. (2017). Plant factories; crop transpiration and energy balance. *Agricultural Systems*, 153, 138-147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.003>.

- Graamans, L., Baeza, E., van den Dobbelsteen, A., Tsafaras, I., Stanghellini, C. (2018). Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems*, 160, 31-43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003>.
- Guglielmetti, R., Macumber, D., & Long, N. (2011). Openstudio: An open source integrated analysis platform. Dans *12th Conference of International Building Performance Simulation Association Building Simulation 2011, BS 2011, November 14, 2011 - November 16, 2011* (pp. 442-449). International Building Performance Simulation Association.
- Harbick, K., Albright, L.D. (2016). Comparison of energy consumption: greenhouses and plant factories. *Acta Hortic*, 1134, 285-292. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.38>.
- Hendricks, P. (2012). *Life Cycle Assessment of Greenhouse Tomato (Solanum lycopersicum L.) Production in Southwestern Ontario* (The University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada). Repéré à <http://hdl.handle.net/10214/4052>
- Heuvelink, E., & Dorais, M. (2005). Crop Growth and Yield. Dans *Tomatoes*. Wallingford, Oxfordshire: CABI Publishing.
- Hydro-Québec. (2017). *Sustainability report 2017*. Québec.
- ISO. (2006a). *ISO 14040:2006 Environmental management, Life cycle assessment, Principles and framework*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- ISO. (2006b). *ISO 14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO).
- ISO. (2008). *15686-5: buildings and constructed assets--service-life planning--part 5: life-cycle costing*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6), 324. doi: 10.1007/bf02978505. Repéré à <https://doi.org/10.1007/BF02978505>
- Kim, J. J. (2016). Economic analysis on energy saving technologies for complex manufacturing building. *Resources, Conservation and Recycling*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.018>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344916300520>

- Knight, T. A. (1808). A description of a Forcing House for Grapes; with Observation on the best Method of constructing them for other Fruits. Dans *Transactions of the Horticultural Society of London* (Vol. Volume 1). London.
- Koesling, M., Ruge, G., Fystro, G., Torp, T., & Hansen, S. (2015). Embodied and operational energy in buildings on 20 Norwegian dairy farms – Introducing the building construction approach to agriculture. *Energy and Buildings*, 108, 330-345. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.012>.
- Kokogiannakis, G., & Cooper, P. (2015). Evaluating the environmental performance of indoor plants in buildings. Dans *14th Conference of IBPSA, BS 2015*. International Building Performance Simulation Association.
- Lawand, T. A., Alward, R., Saulnier, B., & Brunet, E. (1975). The development and testing of an environmentally designed greenhouse for colder regions. *Solar Energy*, 17(5), 307-312. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(75\)90048-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(75)90048-1).
- Léveillé-Guillemette, F., & Monfet, D. (2018). *Calibration d'un modèle énergétique et analyse économique de mesures de conservation d'énergie d'une serre communautaire à Montréal* présentée à eSim 2018, 10th conference of IBPSA-Canada, Montreal.
- McCartney, L., & Lefsrud, M. G. (2018). Protected agriculture in extreme environments: A review of controlled environment agriculture in Tropical, arid, polar, and urban locations. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(2), 455-473. doi: 10.13031/aea.12590. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85046073506&doi=10.13031%2faea.12590&partnerID=40&md5=bfb083e4fc2256bf7c28ccd50221441e>
- Medina, A., Cooman, A., Parrado, C. A., & Schrevers, E. (2006). Evaluation of energy use and some environmental impacts for greenhouse tomato production in the high altitude tropics. Dans (718 éd., pp. 415-422). International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium. doi: 10.17660/ActaHortic.2006.718.48.
- MELCC. (2019). Normales climatiques 1981-2010, Climat du Québec. Repéré le 11-29 à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/normales/climat-qc.htm>
- Milan, C. O. (2015). Milan Urban Food Policy Pact. Repéré le 2017-04-28 à <http://www.milanurbanfoodpolicypact.org/>
- Monteith, J. L. (1981). Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107(451), 1-27. doi: 10.1002/qj.49710745102.

- Montero, J. I., Munoz, P., Baeza, E., & Stanghellini, C. (2017). Ongoing developments in greenhouse climate control. Dans (1182 éd., pp. 1-14). International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium. doi: 10.17660/ActaHortic.2017.1182.1.
- Muñoz, P., Antón, A., Nuñez, M., Paranjpe, A., Ariño, J., Castells, X., . . . Rieradevall, J. (2008) Comparing the environmental impacts of greenhouse versus open-field tomato production in the Mediterranean region. du volume): *Vol. 801 PART 2* (pp. 1591-1596): International Society for Horticultural Science.
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestad, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Nadal, A., Llorach-Massana, P., Cuerva, E., López-Capel, E., Montero, J. I., Josa, A., Royapoor, M. (2017). Building-integrated rooftop greenhouses: An energy and environmental assessment in the mediterranean context. *Applied Energy*, 187(Supplement C), 338-351. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.051>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916316361>
- NRCAN. (2018). NECB Archetypes Generator. Repéré le 2018-10-01 à https://github.com/canmet-energy/necb_archtypes_generator
- Office de l'efficacité énergétique. (2016). *Évolution de l'efficacité énergétique au Canada de 1990 à 2013*. Ressources naturelles Canada Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/energie/publications/19031>.
- Page, G., Ridoutt, B., & Bellotti, B. (2012). Carbon and water footprint tradeoffs in fresh tomato production. *Journal of Cleaner Production*, 32, 219-226. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.036>.
- Payen, S., Basset-Mens, C., & Perret, S. (2015). LCA of local and imported tomato: An energy and water trade-off. *Journal of Cleaner Production*, 87(1), 139-148. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.09.007.
- Pfister, S., Saner, D., & Koehler, A. (2011). The environmental relevance of freshwater consumption in global power production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(6), 580-591. doi: 10.1007/s11367-011-0284-8.

- Plyler, W. (2012). *"Near-by Nature": A Logical Framework for Building Integrated Agriculture* (Ph.D., West Virginia University, Ann Arbor). Repéré à ProQuest Dissertations & Theses Global.
- Pons, O., Nadal, A., Sanyé-Mengual, E., Llorach-Massana, P., Cuerva, E., Sanjuan-Delmàs, D., Rovira, M. R. (2015). Roofs of the Future: Rooftop Greenhouses to Improve Buildings Metabolism. *Procedia Engineering*, 123, 441-448. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.084>.
- Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., & Shiina, T. (2009). A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*, 90(1), 1-10. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877408002793>
- Royal Philipps, N. (2018). Horticulture LED solutions GreenPower LED toplighting. Repéré le 2019-02-25
- Sanjuan-Delmàs, D., Llorach-Massana, P., Nadal, A., Ercilla-Montserrat, M., Muñoz, P., Montero, J. I., . . . Rieradevall, J. (2018). Environmental assessment of an integrated rooftop greenhouse for food production in cities. *Journal of Cleaner Production*, 177, 326-337. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.147>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617331062>
- Sanyé-Mengual, E. (2015). *Sustainability assessment of urban rooftop farming using an interdisciplinary approach* (Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelone).
- Sanyé-Mengual, E., Kahane, R., Gianquinto, G., & Geoffriau, E. (2018). Evaluating the current state of rooftop agriculture in Western Europe: categories and implementation constraints. Dans (1215 éd., pp. 325-332). International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium. doi: 10.17660/ActaHortic.2018.1215.60. Repéré à <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1215.60>
- Sanyé-Mengual, E., Oliver-Solà, J., Ignacio Montero, J., & Rieradevall, J. (2015). *Using a multidisciplinary approach for assessing the sustainability of urban rooftop farming* présentée à AESOP Sustainable Food Planning 2015, Torino, Italy.
- Sanyé-Mengual, E., Oliver-Solà, J., Montero, J. I., & Rieradevall, J. (2015). An environmental and economic life cycle assessment of rooftop greenhouse (RTG) implementation in Barcelona, Spain. Assessing new forms of urban agriculture from the greenhouse structure to the final product level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(3), 350-366. doi: 10.1007/s11367-014-0836-9.

- Schmutz, U., Kneafsey, M., Kay, C. S., Doernberg, A., & Zasada, I. (2018). Sustainability impact assessments of different urban short food supply chains: Examples from London, UK. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 33(6), 518-529. doi: 10.1017/S1742170517000564.
- SIMEB. (2017). Fichiers météo pour le Québec. Repéré le septembre à https://www.simeb.ca:8443/index_fr.jsp
- Sonesson, U., Davis, J., Hallström, E., & Woodhouse, A. (2019). Dietary-dependent nutrient quality indexes as a complementary functional unit in LCA: A feasible option? *Journal of Cleaner Production*, 211, 620-627. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.171.
- SPSQ. (2008). Rapport Final "Augmentation de l'efficacité énergétique dans la production en serre par la réalisation d'autits".
- Syndicat des producteurs en serre du Québec. (2011). *Rapport final Projet-pilote en sericulture*. Bureau de l'efficacité et de l'innovation énergétiques.
- Talbot, M.-H. (2019). *Développement d'une approche d'estimation de l'impact des plantes sur les charges d'un espace d'agriculture intégrée au bâtiment* (École de technologie supérieure, Montréal).
- Talbot, M.-H., & Monfet, D. (2018). *Impact des plantes sur les charges d'un espace d'agriculture intégré au bâtiment : Implantation d'un modèle de plantes* présentée à eSim 2018, 10th conference of IBPSA-Canada, Montreal.
- Tong, G., Christopher, D. M., Li, T., & Wang, T. (2013). Passive solar energy utilization: A review of cross-section building parameter selection for Chinese solar greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 540-548. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.026>.
- Torrellas, M., Anton, A., Ruijs, M., Garcia Victoria, N., Stanghellini, C., & Montero, J. I. (2012). Environmental and economic assessment of protected crops in four European scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 28, 45-55. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.11.012.
- Udink ten Cate, A. J. (1983). *Modeling and (adaptive) control of greenhouse climates* (Udink ten Cate, Wageningen). Repéré à <http://edepot.wur.nl/205635>
- UN. (2015). World population prospects: The 2015 revision, key findings and advance tables. *Working PaperNo.*

- Vanthoor, B. H. E., Stanghellini, C., Van Henten, E. J., & De Visser, P. H. B. (2011). A methodology for model-based greenhouse design: Part 1, a greenhouse climate model for a broad range of designs and climates. *Biosystems Engineering*, 110(4), 363-377. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2011.06.001.
- Ward, R., Choudhary, R., Cundy, C., Johnson, G., & McRobie, A. (2015). Simulation of plants in buildings; incorporating plant-Air interactions in building energy simulation. Dans *14th Conference of International Building Performance Simulation Association, BS 2015, December 7, 2015 - December 9, 2015* (pp. 2256-2263). International Building Performance Simulation Association.
- Whittinghill, L. J. (2012). *Vegetable production using green roof technology and the potential impacts on the benefits provided by conventional green roofs* (Ph.D., Michigan State University, Ann Arbor). Repéré à ProQuest Dissertations & Theses Global.
- Wittwer, S. H., & Castilla, N. (1995). Protected Cultivation of Horticultural Crops Worldwide. 5(1), 6. doi: 10.21273/horttech.5.1.6.